

Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 181

bast

Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

von

Manuel Hülsbömer
Hans-Hermann Weßelborg

Forschungsgruppe Verkehrswesen
Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachhochschule Münster

Daniel Gogolin
Sarah Mörchen

Ingenieurgesellschaft PTM Dortmund mbH

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 181

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 04.0284
Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

Fachbetreuung
Claudia Podolski

Referat
Analyse und Entwicklung von Straßenoberbauten

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-714-3

Bergisch Gladbach, Februar 2023

Kurzfassung – Abstract

Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

Das Georadarmessverfahren gehört zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren und ist im Bereich des Straßenwesens zur Detektion von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen sowie des eigentlichen Konstruktionsaufbaus einer Straßenbefestigung nutzbar. Der wesentliche Vorteil des Verfahrens liegt in der quasi-kontinuierlichen Gewinnung von Messdaten in Längsrichtung oder in der Fläche. Im Zuge einer straßenbautechnischen Interpretation kann dadurch anstelle punktueller Daten (z. B. durch Bohrkern) auf lückenlose Messprofile zurückgegriffen werden.

Die Zielsetzung des Projektes war es, anhand von objekt- und netzbezogener Untersuchungen Aussagen über die potenzielle Genauigkeit in der Wiedergabe von Schichtgrenzen sowie über die Erkennung von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen zu treffen. Die Objektebene wurde dabei durch eine idealisierte Versuchsstrecke abgebildet. Die netzbezogenen Untersuchungen wurden auf insgesamt fünf Bundesautobahnen und fünf Bundesstraßen durchgeführt.

Hierbei konnte festgestellt werden, dass in Bezug auf die Detektion von Schichtgrenzen eine verfahrenstechnische Ungenauigkeit von ca. $\pm 2,5$ cm erwartbar ist. Dabei stellten sich Scanraten von mindestens 10 Scans/m als zweckmäßig heraus. Sofern auch die Untersuchung von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen von Bedeutung sind, zeigten die Untersuchungen, dass engere Messpunktabstände von höchstens 5,0 cm ($\hat{=}$ 20 Scans/m) und die Verwendung einer Messfrequenz von 2.000 MHz zielführend sind, um eine ausreichende Auflösung und Datendichte zu gewährleisten.

Zudem wurde die Möglichkeit der Kombination des Georadarmessverfahrens mit der messtechnischen Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) untersucht und eine potenzielle Vorgehensweise hierfür entwickelt. Diese beinhaltet auch eine Definition von homogenen Abschnitten auf Untersuchungsstrecken mittels mehrerer Homogenitätskriterien.

Ebenfalls wurden Ansätze für automatisierte Auswertungen von Georadar-Daten aufgezeigt.

Possibilities and limits of the Ground Penetrating Radar

The Ground Penetrating Radar (GPR) is a non-destructive test method and can be used for the detection of structural damages and substance characteristics as well as the general construction of roads. The main advantage of the method is the quasi-continuous measurement of data in longitudinal direction or in the area. For the road construction interpretation this can be used to generate measurement profiles instead of local data (for example by drill cores).

The objective of the project was to make statements on the potential accuracy in the interpretation of layer boundaries as well as on the detection of structural damages and substance characteristics based on object- and net-related investigations. The object plane was presented by an idealised test track. The net-related investigations were carried out on a total of five federal motorways and five federal highways.

It could be determined that with regard to the interpretation of layer boundaries, a procedural accuracy of approximately ± 2.5 cm is to be expected. Scan rates of at least 10 scans/m were found to be expedient. Insofar as the investigation of structural damages and substance characteristics is also important, the investigations showed that closer measuring point distances of at least 5.0 cm ($\hat{=}$ 20 scans/m) and the use of a frequency of 2,000 MHz are expedient in order to ensure sufficient resolution and data density.

In addition, the possibility of combining the GPR with the road condition survey and assessment was investigated and a potential procedure was developed. In addition a definition of homogeneous sections on test tracks using several homogeneity criteria was worked out.

Also approaches for automated evaluations of GPR data were presented.

Summary

Possibilities and limits of the Ground Penetrating Radar

1 Question and Objective

The FE project aims to analyse the usability of the Ground Penetrating Radar (GPR) for the structural investigation of non urban asphalt pavements. As a non-destructive test method, it is used for the detection of structural damages and substance characteristics on roads. The main advantage over the conventional destructive drilling core extraction is the quasi-continuous measurement of data in longitudinal direction.

At the time the project was carried out, however, there was still uncertainty regarding the actual detection options for structural damages and the appropriate measurement settings. In addition, there was a need for statements regarding the potential accuracy of the method when reproducing layer boundaries as well as the causes of measurement uncertainties and deviations. In addition, the potential for automatisms in data evaluation and data interpretation had to be researched in order to determine the possibilities of minimising the uncertainty factor of the manual evaluation and to reduce the associated risks of misinterpretation. This aimed equally at the possibility of future establishment of uniform standards in data evaluation and data interpretation.

The project comprised a total of seven essential work steps, which are shown in a general project outline in Figure 1.

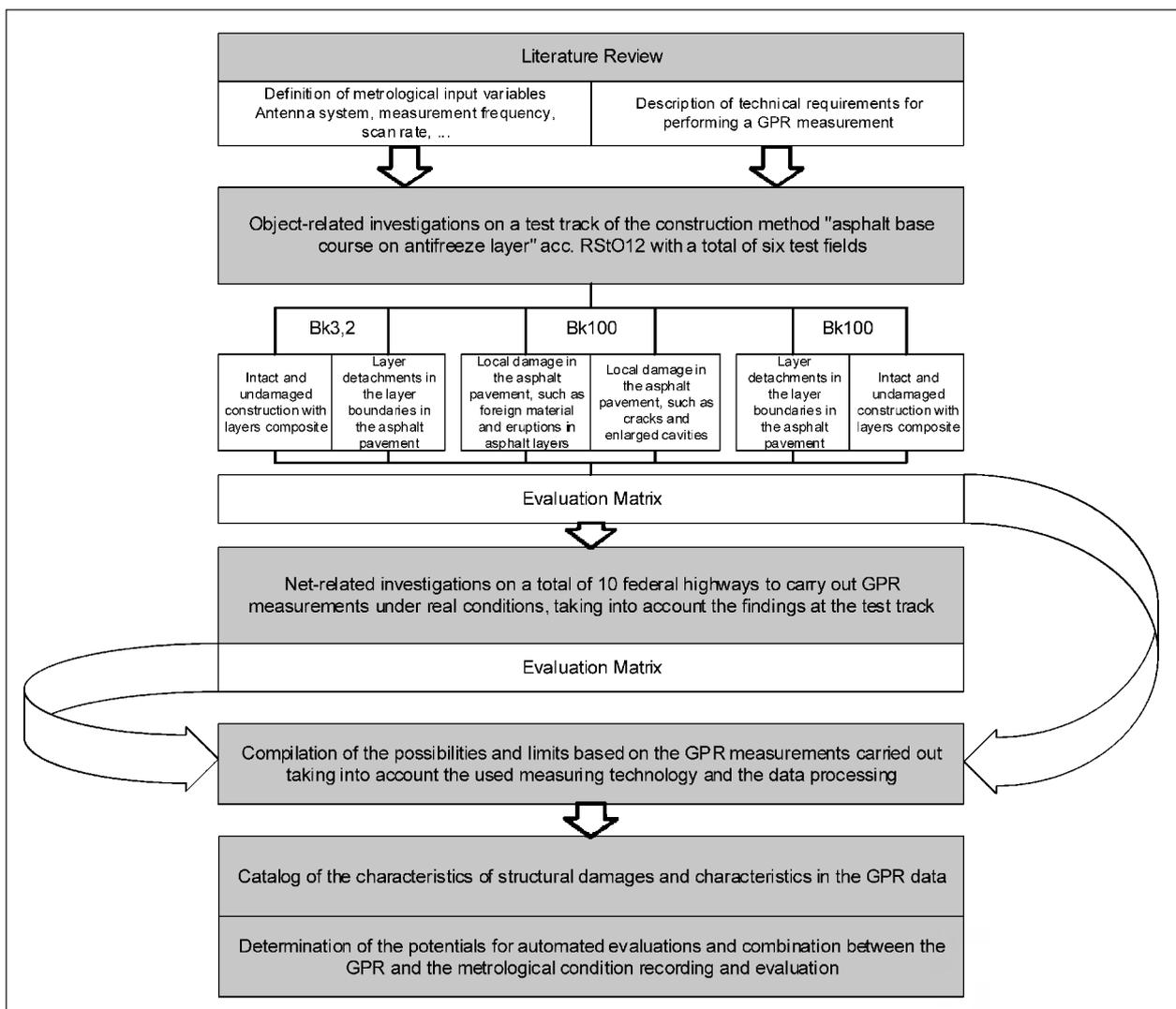


Fig. 1: General project outline with the essential work steps

2 Measuring Technology

The investigations with the GPR were carried out with the radar controls SIR 20® and SIR 30® from the manufacturer GSSI. A bistatic pulse radar with two air-coupled horn antennas with measuring frequencies of 1,000 and 2,000 MHz were used. An encoder for position measurement on the rear axle of the vehicle and a video camera for recording the road surface through the front of the vehicle were installed as additional measuring instruments. At the network level, a global navigation satellite system (GNSS) was also used to determine the position (GPS) and at the object level an edge distance meter was installed to maintain the edge distances and reduce fluctuations in the route. The latter served to create a uniform basis for performing repeat measurements to investigate the reproducibility of measurement results and the quantification of potential measurement uncertainties.

For reasons of compatibility, the data processing was carried out with the software “Radar Data Analyzer” (RADAN®) from the manufacturer GSSI. The evaluation and interpretation of the measurement data in the context of post-processing was carried out using the specified CSV data output format in text-processing and spreadsheet software.

3 Test program

The FE project comprised a total of two test programs, which were broken down into object- and net-related studies. The test program of the object level was mapped in the application mentioned by an idealised test track in Sundern in the Sauerland region, which was modeled on a road in the federal trunk road network. This was true both for the dimensioning and the construction in the load classes Bk3.2 and Bk100 of the construction

“asphalt base course on antifreeze layer” according to RStO12 as well as for the artificially constructed structural damages and substance characteristics. The aim of the test track was to systematically investigate the possibilities and limits of use of the GPR under largely controlled environmental conditions, without sources of electrical interference and excluding road traffic.

The test track consisted of a total of six consecutive test fields, each with specific construction details. The undamaged areas of the test track served as reference areas for the construction of the respective load class. The damaged sample fields in turn served to identify structural damages, with the focus on flat layer detachments and local damages, such as enlarged cavities, single cracks or foreign material (Figure 2). The focus was on deriving the visual characteristics for a systematised approach in interpretation.

The GPR measurements were carried out on the test track along defined measuring lines in dry weather, whereby a comparative study was carried out with regard to the suitability of different measuring frequencies and measuring point distances. The other measuring frequencies 300, 800, 1,600 and 2,600 MHz were used. To investigate the influence of different data densities on the measurement result, the point distances 10, 20, 50 and 100 measurement points per meter were distinguished.

For control and calibration purposes, the test track was sampled along the measurement lines of the 2,000 MHz radar antenna. The extracted cores were used as an independent correlation variable in the data evaluation. In this context, 145 drill cores were removed in a 1-m-grid from each measuring line (Figure 3). Overall, comparative studies and analyses based on 435 cores were carried out in this way.



Fig. 2: Selection of artificially produced structural damages on the test track



Fig. 3: Sampling the measuring lines of the 2,000 MHz radar antenna using drill cores in a 1-m-grid

The network level test program included GPR measurements under real practical conditions on a total of five federal motorways and five federal highways in the federal states of North Rhine-Westphalia, Rhineland-Palatinate and Saxony-Anhalt. The aim was to check the transferability of the results determined on the object level to the network level and to examine the influence of the prevailing framework conditions. This was particularly true for the measurement environment, due to swimming in road traffic at speeds up to 80 km/h, and for the fact that the construction of the test sections, in contrast to the object level, was an unknown quantity. The total length of the test sections was approximately 80 kilometers, while the data used for the evaluation covering a smaller sub-area.

4 Research results

4.1 Detection of structural damages and substance characteristics

In order to identify substance characteristics and structural damages in GPR data, systematisation with regard to identifiable characteristics in radargrams is required to visualise the GPR data in form of a longitudinal profile (B-scan). In a first step, a general visual pattern recognition of the various artificially produced substance characteristics and structural damages was carried out and then compiled in form of a catalog. A distinction was made between longitudinal and transverse damages. In the case of damages and layer boundaries extending in the measuring direction, the reflection predominates due to the shape and geometry of the interfaces, so that these are represented as continuous horizontal lines in the radargram. Damaged areas can be visually distinguished from undamaged areas by a different

expression and phase of the amplitudes of the reflection.

Substance characteristics and structural damages that run at right angles to the measurement direction are shown in radargrams in form of diffraction hyperbolas due to the smaller shape and geometry compared to the wavelength of the electromagnetic pulses, which can be attributed to diffraction and scattering effects. The hyperbolic representation results from the spatial and conical radiation of the GPR antennas, so that reflections of objects and features are already registered, which are at a horizontal distance from the antenna position. In relation to the antenna position, this results in longer transit times for the electromagnetic waves to the reflector. By migrating the measurement data, corresponding diffraction hyperbolas in the radargram can be shifted to the correct position and focused with regard to the vertex as the shortest vertical distance between the reflector and the radar antenna position. As part of the data analysis, it was found that measuring point distances of at least 20 scans per meter are pertinent for adequate recognition and display of the diffraction hyperbolas in the radargram. Regarding the measurement frequency, the evaluations showed that frequencies $\geq 2,000$ MHz can be used for the detection of corresponding structural damages and substance characteristics. For the sole detection of the pavement structure and the road substance, lower frequencies of 1,000 MHz are again expedient in order to detect both the bound and the unbound superstructure.

4.2 Accuracy examination of the GPR measurements in the present application

The examination of the accuracy of the GPR measurements with regard to the correct specification of the depth of layer boundaries in the radargram was carried out in the present application on the basis of a comparison of three common calculation methods. The aim was to determine the most expedient procedure, which showed the smallest deviations from the core samples taken from the test track. The calculation methods included the following:

1. Specification of the depth of the reflections from layer boundaries based on table and empirical values for the wave propagation velocity v and relative permittivity ϵ_r .

2. Calculation of the depth of the reflections by an algorithm which iteratively determines the reflection coefficients of the layer boundaries by means of the reflection amplitudes and in this way determines the wave propagation speed in the individual asphalt layers.
3. Calculation of the wave propagation velocity v and the relative permittivity ϵ_r by calibrating the radargrams true to the station by determining the layer thickness at the extracted cores.

Based on statistical evaluations, a fundamental increase in measurement deviations with increasing depth of the layer boundary in the pavement structure could be determined regardless of the calculation method. As expected, calibration of the GPR data led to the best results. The deviations using an air-coupled horn antenna with the measuring frequency $f = 2,000$ MHz were a minimum of ± 1.5 cm in the asphalt surface course with a total layer thickness depending on the load class of 2.5 cm or 4.0 cm and a maximum of ± 2.5 cm for the other asphalt layers and for the total thickness of the asphalt pavement with 22.0 cm (Bk3.2) and 34.0 cm (Bk100). As expected, these deviations were ascertained for all the measuring point distances provided in the variant comparison of the GPR measurements, so that there is no connection between the measuring accuracy and the scan rate. Using the uncalibrated GPR data, which are based on table or empirical values, unequally higher deviations up to ± 10.0 cm were determined, so that corresponding values should only be used to estimate the measurement depth. Furthermore, the calibration enables a direct approach to the road pavement and material technology analyses.

At the same time, it was found that the asphalt surface courses could not be dissolved by the measurement technology used due to the vertical resolution. The background was on the one hand the thin layer thicknesses up to 4.0 cm and on the other hand the metrological settings from measuring frequency and pulse duration as well as the prevailing relative permittivity of asphalt. The importance of the extraction of drill cores had to be emphasised, so that the thickness of the asphalt surface course was determined in situ and used as a basis for interpretation the GPR data.

Due to the electromagnetic property profile of asphalt, the relative permittivity is the essential material parameter in the analysis and interpretation

of GPR data. A corresponding study to estimate the quantification by means of statistical evaluations basically confirmed the range of values shown in the relevant literature with values between 5.00 and 9.00 for all asphalt layers analysed. Due to the various influencing factors, such as the material composition of asphalt, as well as the generally determined distribution of the measured values, more specific stipulations were not considered to be expedient.

5 Aspects of maintenance planning and building contract connection

Based on the evaluations and analyses carried out in the FE project, no uniform technical basis could be derived in order to permit the measurement procedure to be anchored in the construction contract at the current time. Due to the issues to be clarified with regard to the systematic detection options for structural damages, the GPR measurement method is currently still in the process of collecting experience from the point of view of the authors. The GPR is therefore primarily to be seen as a supplementary instrument in the management and control of the quality of construction measures in maintenance planning or as a tool in inventory assessment. In the course of the implementation of mandatory control tests, the quasi-continuous measurement data can be used as an aid for the more targeted determination of drilling core points and the corresponding subareas. This procedure is equally conceivable in the course of the contractor's self-monitoring tests.

In the present application case it could also be shown that the examination sections can be divided into homogeneous sections, in particular based on GPR measurements. For this purpose, three homogeneity criteria were developed in order to make a correlative definition of changes in structure or section in the road. The homogeneity criteria were both a quantitative analysis of the dimensionally relevant asphalt boundary for estimating the load class by means of continuous average values from longer evaluation sections, as well as two structural and qualitative analyses. These included the sequence of layers and extensive damage to the structure, such as layer detachments or open-pore asphalt layers (Figure 4).

The homogeneous section formation and the generation of quasi-continuous measurement data

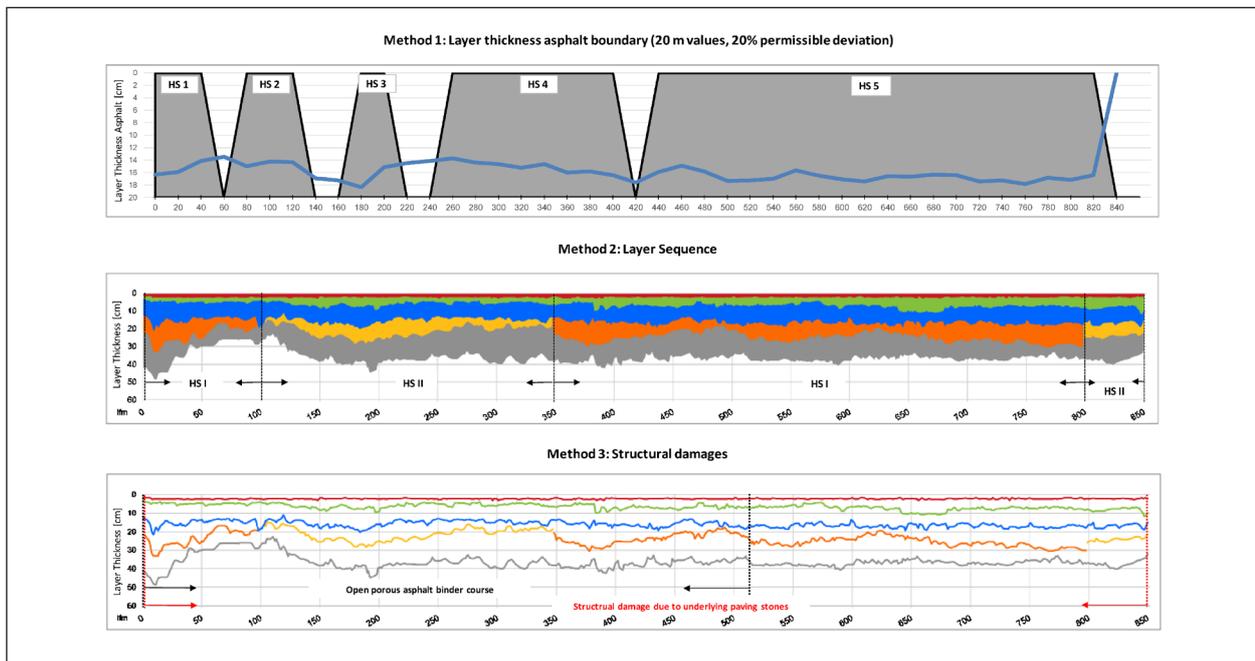


Fig. 4: Exemplary excerpt from a final presentation of the homogeneous sections (HA) of an examination stretch (PTM Dortmund)

by the GPR offers the possibility of intersection with other non-destructive measurement systems. The metrological condition recording and evaluation, which includes the quality and condition of the road surface as a priority measurement result, is particularly useful. With the GPR, a supplementary measurement method is available to record the quality and structure of the road substance in addition to the road surface and, for example, to take into account in the maintenance planning as a quasi-continuous data set. With the intersection of these two measuring systems, a larger data pool is available to carry out a more targeted research into the causes of damage that has occurred on and in the road, for example in maintenance planning. A corresponding visualisation of both measuring systems was developed within the FE project.

6 Potential for automated data analysis

In order to standardise the evaluation of GPR data and to compare different GPR systems, standardisation procedures seem sensible. Automated evaluations are a conceivable component. In doing so there are two main areas to be distinguished. The first section relates to the basic inclusion of the pavement structure through the existing layer boundaries. Automation is conceivable here, since the reflections of the layer boundaries in the course

of the scans over time and their correlation in the measurement profile are based on defined amplitude distributions. The second section includes the automated detection and evaluation of structural damages and substance characteristics. From the point of view of the authors, this aspect is considered to be very complex, since specific assignments to reflection patterns appearing in the radargram have to be made, which actually include corresponding damage. Since this cannot be unequivocally based on the GPR data, the risk of misinterpretation can be classified as significant.

Inhalt

1	Einleitung	11	4.3	Versuchsprogramm der Objektebene	43
2	Literaturrecherche	12	4.3.1	Allgemeine Vorgehensweise	43
2.1	Das Georadarverfahren in Deutschland	12	4.3.2	Witterungsbedingungen	45
2.2	Einsatz und Erfahrungen im Ausland	14	4.3.3	Variation der Messfrequenz	45
			4.3.4	Variation der Scanrate	46
			4.3.5	Beprobung der Objektebene	47
3	Grundlagen der Verfahrens- technik	17	5	Messergebnisse der Objektebene	48
3.1	Messprinzip	17	5.1	Ermittlung von Schichtgrenzen unter weitestgehend idealisierten Bedingungen	48
3.2	Physikalische Grundlagen	19	5.1.1	Feststellung des tatsächlichen Konstruktionsaufbaus	48
3.2.1	Physikalische Größen	19	5.1.2	Wiedergabe der Schichtgrenzen mit dem Georadarverfahren	50
3.2.2	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen	20	5.2	Mustererkennung von Substanzmerk- malen und Substanzschädigungen	52
3.2.3	Detektionstiefe und Auflösungs- vermögen	22	6	Das Georadarverfahren auf Netzebene	53
3.3	Definition von messtechnischen Größen	24	6.1	Definition der Netzebene	53
3.3.1	Messsystem	24	6.2	Untersuchungsstrecken im Bundes- fernstraßennetz	54
3.3.2	Untersuchungsmedium	26	6.3	Beprobung der Netzebene	55
3.3.3	Umgebungsfaktoren	28	7	Messergebnisse der Netzebene	56
3.4	Messtechnik des Versuchs- programms	29	7.1	Wiedergabe von Schichtgrenzen im Praxisfall	56
3.4.1	Gerätekonfiguration	29	7.2	Mustererkennung von Substanzmerk- malen und Substanzschädigungen	57
3.4.2	Processing	29	8	Auswertung der Messdaten	58
3.4.3	Post-Processing	36	8.1	Wiedergabe von Schichtgrenzen	58
4	Das Georadarverfahren auf Objektebene	38	8.1.1	Deskriptive Vergleichsbetrachtung der Auswertemethoden des Versuchsprogramms	58
4.1	Definition der Objektebene	38	8.1.2	Analyse der Abweichungen zwischen Georadar und Bohrkern	59
4.2	Konstruktionsdetails der Objektebene	38			
4.2.1	Allgemeines Baukonzept	38			
4.2.2	Baudokumentation/Bauüber- wachung	39			
4.2.3	Detailübersicht Probefeld 1	40			
4.2.4	Detailübersicht Probefeld 2	41			
4.2.5	Detailübersicht Probefeld 3	42			

8.1.3	Studie zur Quantifizierung der relativen Permittivität ϵ_r von Asphalt . . .	68	11	Prüfung der Übertragbarkeit von Objekt- und Netzebene	109
8.2	Systematische Darstellungen von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen	74	12	Visualisierung von Messergebnissen	111
8.2.1	Visuell feststellbare Charakteristika im Radargramm	74	12.1	Art und Umfang des Messergebnisses	111
8.2.2	Wellenmuster im O-Scope	77	12.2	Darstellung von Georadar-Daten in ingenieurtechnisch nutzbaren Formaten	113
8.2.3	Migration von Diffraktionshyperbeln . . .	82	12.3	Verschneidung des Georadarverfahrens mit der messtechnischen ZEB	114
8.2.4	Quantifizierung von elektromagnetischen Parametern	83	13	Bauvertragliche Anknüpfungspunkte	119
8.3	Definition von homogenen Abschnitten	85	14	Konzeptionierung und Umsetzung automatisierter Auswertungen	120
8.3.1	Allgemeine Definitionsgrundlagen . . .	85	14.1	Automatisierung des Post-Processings	120
8.3.2	Verlauf der dimensionierungsrelevanten Asphaltgrenze	86	14.1.1	Datenstrukturierung	120
8.3.3	Änderung des Konstruktionsaufbaus . . .	89	14.1.2	Datenvorbereitung	121
8.3.4	Flächenhafte Schädigungen der Straßensubstanz	89	14.1.3	Datenauswertung	122
8.3.5	Überprüfung der Homogenitätskriterien auf Objektebene	90	14.1.4	Erstellung von Datenexporten	125
9	Definition von Messunsicherheiten und Abweichungen	92	14.2	Prozessautomatisierung im Rahmen der straßenbautechnischen Interpretation	125
9.1	Allgemeine Definitionsgrundlagen . . .	92	14.2.1	VBA-basierte Programmbausteine . . .	125
9.2	Messgrößen und Messtechnik	94	14.2.2	Berechnung homogener Abschnitte	129
9.3	Softwarebedingte Messabweichungen .	99	15	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	129
9.4	Verortungsfehler von Messdaten	100	16	Zukünftiger Forschungsbedarf	132
9.5	Äußere Störeinflüsse	101	Literatur	134	
9.6	Messunsicherheiten und Abweichungen aus der Probennahme	102	Bilder	138	
9.6.1	Entnahme von Bohrkernen	102	Tabellen	142	
9.6.2	Schichtdickenmessung am Bohrkern . . .	102	Die Anhänge zum Bericht sind vom BAST-Fileserver unter https://files.bast.de/index.php/s/Rg9LcyfJj3Aeyrm abrufbar.		
10	Bewertung der Messdaten	103			
10.1	Allgemeine Bewertung der Versuchsprogramme	103			
10.2	Genauigkeit des Georadarverfahrens im vorliegenden Anwendungsfall	105			
10.3	Zweckmäßige Festlegung der relativen Permittivität	108			
10.4	Bewertungsmatrizen	109			

1 Einleitung

Das Georadarverfahren gehört zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren und ist im Bereich des Straßenwesens zur Detektion der Straßensubstanz und des Konstruktionsaufbaus nutzbar. In der gängigen Literatur wird es zumeist als Impulsradar oder Impuls-Echo-Verfahren bezeichnet, da elektromagnetische Wellen in Form von Impulsen abgestrahlt und deren Echos oder Reflexionen als Messdaten wieder aufgenommen werden. Da diese Reflexionen an Grenzflächen mit unterschiedlichen elektromagnetischen Eigenschaften aus Permittivität ϵ , magnetischer Permeabilität μ und elektrischer Leitfähigkeit σ entstehen, kann das Verfahren genutzt werden, um Schichtgrenzen, Leitungen sowie Substanzschädigungen zu erfassen. Der wesentliche Vorteil des Verfahrens gegenüber der konventionellen zerstörenden Bohrkernentnahme ist die quasi-kontinuierliche Gewinnung von Messdaten in Längsrichtung oder in der Fläche. Vor dem Hintergrund einer straßenbautechnischen Interpretation kann dadurch auf flächige Messdaten zurückgegriffen werden, wodurch sowohl eine Verbesserung in der Bewertung des gebundenen und ungebundenen Oberbaus und damit der Dimensionierung der Straße als auch in der Verortung von Substanzmerkmalen in Ausprägung, Lage und Tiefe zu erwarten ist.

Durch den zerstörungsfreien Charakter des Prüfverfahrens ist die direkte Ansprache der Straßensubstanz als Untersuchungsmedium jedoch nicht möglich, da die Messdaten über das elektromagnetische Eigenschaftsprofil bzw. die darin enthaltenen Substanzmerkmale definiert sind und daher ausschließlich eine abgeleitete Größe darstellen. Inwieweit hierbei auf eine direkte Ansprache der Straßensubstanz verzichtet werden kann, hängt von der Zielsetzung der Georadarmessung und der bereits vorhandenen Datenlage zu dem Untersuchungsabschnitt, zum Beispiel aus der Erhaltungsplanung oder vergangenen Beprobungen, ab. Im Regelfall ist allerdings die Georadarmessung durch die gezielt verortete Entnahme von Bohrkernen zu unterstützen. Dies sollte zum einen zur Generierung von Referenzpunkten, an denen die Messdaten des Georadars zu kalibrieren sind, und zum anderen zur Gewährleistung einer umfänglichen Interpretation der Messdaten durchgeführt werden. Darüber hinaus wird eine ergänzende materialtechnologische Betrachtung ermöglicht.

Die Auswertung der Messdaten erfolgt nach aktuellem Stand der Technik im Wesentlichen manuell durch die Interpretation des Radargramms als Längs- oder Querschnitt durch den Konstruktionsaufbau. Die Qualität und die Aussagekraft des Ergebnisses einer Georadarmessung hängen somit fundamental von dem auswertenden Fachpersonal ab. Bei begrenztem Erfahrungshintergrund und unzureichendem straßenbautechnischem Verständnis besteht dabei das Risiko von Fehlinterpretationen, welche zu Unsicherheiten und Abweichungen im Messergebnis führen.

Derzeit ist das Georadarverfahren hinsichtlich seines Nutzungspotenzials für die Bewertung der Straßensubstanz noch nicht abschließend erforscht. So besteht gerade im Bereich der Erfassung von Substanzschäden, wie Hohlräumen, Rissen oder Inhomogenität, Unsicherheit hinsichtlich der tatsächlichen Detektionsmöglichkeit und der dazugehörigen messtechnischen Einstellungen. Darüber hinaus fehlt es an gesicherten Aussagen über die Genauigkeit des Verfahrens bei der Wiedergabe von Schichtgrenzen, welche fundamentaler Bestandteil einerseits bei der Abschätzung des Konstruktionsaufbaus und andererseits bei der Festlegung einer dazugehörigen Belastungsklasse gemäß den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen“ (RStO) sind.

Die Zielsetzung des Forschungsprojektes ist es, anhand zweier Versuchsprogramme Aussagen über die potenziell erzielbaren Genauigkeiten in der Wiedergabe von Schichtgrenzen sowie in der Erkennung von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen zu treffen. Dabei wird eine grundsätzliche Unterscheidung in der Zielsetzung der Georadarmessung durch eine objekt- und netzbezogene Betrachtung getroffen. Darüber hinaus wird der Einfluss von verschiedenen messtechnischen Größen auf das Messergebnis untersucht und durch die Formulierung von Potenzialen automatisierter Bausteine in der Datenauswertung und Dateninterpretation erforscht. Dabei stehen Ansätze zur Minimierung des Unsicherheitsfaktors der manuellen Auswertung im Vordergrund.

Als Anwendungsfall wurde die Untersuchung von Asphaltbauweisen außerorts vorgegeben.

2 Literaturrecherche

2.1 Das Georadarverfahren in Deutschland

Im Bereich des Straßenwesens wurde das Georadarverfahren in den 1990er Jahren erstmalig umfassend zur flächendeckenden und zerstörungsfreien Substanzerfassung und -bewertung von diversen Kreis- und Landstraßen sowie Brückenbelägen genutzt und dokumentiert [FUNK et al., 1996]. Davor war es vordringlich in den Geowissenschaften und in der Archäologie eingesetzt worden [NÚÑEZ-NIETO et al., 2015]. Bereits in den Anfängen war, neben der Erfassung des Oberbaus aus einzelnen Schichten und deren Grenzverläufen, die Feststellung von Substanzschäden, wie unzureichendem Schichtenverbund, von Interesse. Darüber hinaus sollten Aussagen bezüglich der Messgenauigkeit und der notwendigen Messparameter getroffen werden, um den Konstruktionsaufbau so detailliert wie möglich zu erfassen.

Im Jahr 2001 eruierten FÖRSTER und HOTHAN in dem Forschungsvorhaben FE 09.116/1998/MRB den damaligen Entwicklungsstand des Georadarverfahrens und führten in diesem Zusammenhang umfassende Vergleichsmessungen mit unterschiedlichen Messfrequenzen sowie Anbietern und Dienstleistern durch. Darüber hinaus wurde der Einfluss von Schichtenwasser auf das Messergebnis untersucht. Sehr deutlich konnte in diesem Zusammenhang der Einfluss des Messsystems in Verbindung mit der Messfrequenz ermittelt werden. Auf mehreren Bundesstraßen wurden Messungen sowohl mit hochfrequenten Hornantennen (1.000 und 2.500 MHz) als auch mit fahrzeugmontierten bodengekoppelten Antennen (Messanhänger) mit Frequenzen zwischen 500 und 1.200 MHz durchgeführt. Durch die bessere Abstrahltechnik und die niedrigeren Frequenzen von bodengekoppelten Systemen konnte deren größerer Nutzen für die Detektion von tieferen Schichten und den ungebundenen Oberbau sowie Unterbau nachgewiesen werden.

Eine systematische Vorgehensweise in der Durchführung von Georadarmessungen zur Substanzuntersuchung von Straßen wurde 2003 von GOLKOWSKI in Form einer Arbeitsanleitung entwickelt. Dabei wurde auch erstmalig konkret auf die Unterscheidung zwischen einer netzweiten und einer objektscharfen Untersuchung hingewiesen. Hintergrund war die Änderung der Zielsetzung der Georadarmessung sowie der dazugehörigen Messkon-

figuration und die Quantifizierung der Messparameter. Auf Netzebene wurden in diesem Zusammenhang die grundsätzliche Gewinnung von Substanzdaten sowie deren Einbindung in Pavement-Management-Systeme (PMS) gesehen, welche die Erhaltungsplanung maßgeblich beeinflussen. So konnten konkrete Erhaltungsabschnitte auf Basis von Substanzdaten ausgewiesen und darüber hinaus Priorisierungen in der Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen unter verbessertem Einsatz von Finanzmitteln getroffen werden. Auf Projektebene wurden gezielt die Qualitätskontrolle bei Neubau oder grundhafter Sanierung sowie die konkrete Analyse von Schadensmechanismen als Anwendungsgebiete gesehen. Wie in Kapitel 1 beschrieben, ist Letztere durch die aktuell zu Verfügung stehenden Analyseinstrumente, wie zum Beispiel die messtechnische Zustandserfassung und -bewertung (ZEB), nur bedingt möglich und erfordert den Einsatz zerstörender Eingriffe. Die Arbeitsanleitung griff ebenfalls die direkte Beeinflussung der Datenqualität und Dateninterpretation durch das auswertende Personal auf. Während bei ersten Versuchsmessungen in den Vorjahren von einem menschlichen Fehler seitens der Betreiber von Georadarsystemen von lediglich $\pm 0,3$ % bezüglich der Datengenauigkeit ausgegangen wurde [FÖRSTER und HOTHAN, 2001], scheint es sich bei zunehmender Erfahrung im Umgang mit dem Georadarverfahren um eine erheblich größere Einflusskomponente hinsichtlich der Messergebnisse zu handeln.

Die Verarbeitung und Auswertung von Georadar-Daten ist auch wesentlicher Bestandteil des Merkblattes B 10 (M B 10) der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) aus dem Jahr 2008. Während das Messprinzip des Georadarverfahrens im Bereich des Straßenwesens vollständig erschlossen wurde, stellte sich die Frage nach der zweckmäßigen Datenverarbeitung und Datenaufbereitung in interpretierbare Formate, welche dem Stand der Technik entsprachen. Ausgehend von der Fragestellung und Zielsetzung der Untersuchung gilt es demnach sowohl die Messparameter und die Größe der Datensätze als auch weitere vorhandene Daten für Korrelationen und Verschneidungen einzubeziehen. Das Merkblatt fasst dazu die typischen Verarbeitungsmöglichkeiten von Georadar-Daten zusammen.

Den aktuellen Stand der Anwendungstechnik zum Georadarverfahren fasst das 2016 herausgegebene Arbeitspapier Nr. 443A „Anwendung des Geora-

dars zur Substanzbewertung von Straßen – Teil A“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) zusammen. Als vordringliches Anwendungsgebiet im Bereich des Straßenwesens wird demnach die Feststellung von Schichtdicken sowie deren Verlauf und Abfolge in der Straßensubstanz beschrieben. Die dabei gewonnenen Messdaten sind für eine Vielzahl an ingenieurtechnischen Fragestellungen nutzbar. So kann zum Beispiel eine Straßenbefestigung in eine Belastungsklasse eingeordnet oder ein Fräshorizont festgelegt werden. Gleichmaßen wird eine umfassende Übersicht über mögliche Einflussgrößen auf das Messergebnis gegeben, welche bei deren Definition berücksichtigt und bei der Datenverarbeitung kompensiert werden müssen, um zweckmäßige Ergebnisse zu erzielen. Darüber hinaus werden Empfehlungen für die Durchführung einer Georadarmessung sowie die Datenauswertung und ingenieurtechnische Interpretation gegeben. Insgesamt gibt dieses Arbeitspapier einen guten Überblick über den Stand der Technik des Georadarverfahrens und dessen Einsatz im Rahmen der Substanzbewertung. Dabei werden spezifische Zusammenhänge, wie beispielsweise die Abhängigkeit zwischen Messgeschwindigkeit und notwendiger Anzahl an Scans je Meter bzw. Samples je Scan aufgeführt. Diese hängen maßgeblich von der Fragestellung der Untersuchung ab und werden von dem eingesetzten Antennensystem vorgegeben. Eine Georadarmessung sollte in diesem Zusammenhang die folgenden Kernelemente beinhalten:

- Fragestellung und Zielsetzung der Messung
- Messumgebung
- Messsystem und Messparameter
- Datenverarbeitung
- Dateninterpretation
- Messergebnis
- Erfolgskontrolle

Die aufgezählten Elemente bauen aufeinander auf und unterliegen somit direkten Abhängigkeiten (Bild 1). Um die Notwendigkeit späterer Optimierungsprozesse möglichst gering zu halten, ist es sinnvoll, möglichst viele dieser Aspekte im Vorfeld der Georadarmessung zu definieren.

Ziel muss es dabei sein, dass das Messergebnis die Fragestellung sowie die Zielsetzung erfüllt und ein fundiertes, ingenieurtechnisch nutzbares Resul-

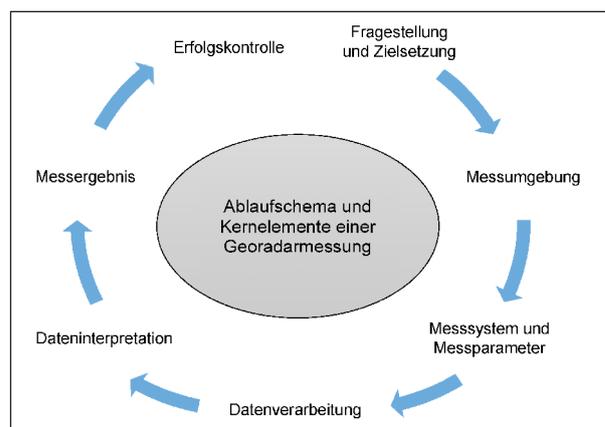


Bild 1: Zweckmäßiges Ablaufschema und Kernelemente einer Georadarmessung

tat vorliegt. Dies schließt die Dokumentation und Aufbereitung der Messdaten in für den Auftraggeber bearbeitbare Formate ein. So können entsprechende Planunterlagen in Form von Schichtmodellen im Längsschnitt oder Streckenbänder mit stationstreuher Verortung der Messdaten in Geoinformationssystemen (GIS) aufbereitet werden. Auch tabellarische Darstellungen der Messwerte mit entsprechenden Protokollen zu gegebenenfalls entnommenen Bohrkernen sind in diesem Zusammenhang sachdienlich. In jedem Fall ist das Messergebnis, durch ein umfassendes Qualitätsmanagement bei allen vorgenannten Elementen, auf Richtigkeit und Plausibilität sowie Zielorientierung kontinuierlich zu kontrollieren und zu protokollieren. Dabei ist es von vordringlicher Bedeutung, dass anhand der damit einhergehenden Dokumentation die Nachvollziehbarkeit der Arbeitsschritte für Dritte, ausgehend von der Fragestellung und Zielsetzung bis hin zum Messergebnis, gegeben ist.

Vor dem Hintergrund der Fragestellung und der Zielsetzung der Georadarmessung sind vor allem der notwendige und geforderte Datenumfang sowie die Genauigkeit der Messdaten von Bedeutung. Im Rahmen der Qualitätskontrolle des Einbauzustandes und des Konstruktionsaufbaus gilt es beispielsweise objektscharfe Messungen vorzunehmen. Im Rahmen der Feststellung der Dimensionierung und Gesamtmächtigkeit des gebundenen Oberbaus, um zum Beispiel eine generelle Erhöhung der Datendichte zu erzielen und einen Mehrwert für ein PMS zu generieren, ist eine netzbezogene Betrachtung vorzunehmen und ein geringerer Datenumfang ausreichend. Zur besseren Vorbereitung der Georadarmessung ist in diesem Zusammenhang die Bereitstellung weiterer Daten durch den Auftraggeber, zum Beispiel hinsichtlich des Konstruktions-

aufbaus der Straßensubstanz, wünschenswert. Ist der Konstruktionsaufbau grundsätzlich bekannt, können daraus notwendige messtechnische Größen, welche das Messsystem und die Straßensubstanz als Untersuchungsmedium betreffen, wie zum Beispiel die Detektionstiefe, der notwendige Frequenzbereich oder das zu erwartende elektromagnetische Eigenschaftsprofil, abgeschätzt werden.

Die Messumgebung sollte sämtliche Parameter beinhalten, welche für die Durchführung der Georadarmessung notwendig sind. Dazu zählen insbesondere die Straßen- oder Netzkategorie des Untersuchungsabschnitts, welche die mögliche Messgeschwindigkeit definiert, der grundsätzliche Umfang der Messung hinsichtlich der Anzahl der Messlinien sowie mögliche äußere Umgebungsfaktoren.

Im Rahmen des Messsystems und der zweckmäßigen Festlegung der Messparameter gilt es sowohl die Zielsetzung der Georadarmessung als auch die Messumgebung einzubeziehen, da diese die Auswahl und Quantifizierung der messtechnischen Größen der Datenerfassung wesentlich beeinflussen. So werden zum Beispiel die Detektionstiefe und das vertikale Auflösungsvermögen maßgeblich mit der genutzten Messfrequenz beeinflusst.

Im Zuge der Datenverarbeitung gilt es, die Georadar-Daten in ingenieurtechnisch interpretierbare Formate zu transformieren. Dazu zählen sowohl eine Kalibriermessung zu Beginn oder zum Ende einer Georadarmessung als auch die gegebenenfalls erforderliche Beprobung des Untersuchungsabschnitts durch die Festlegung von Aufschlüssen, wie zum Beispiel Bohrkernen, zur direkten Ansprache und Feststellung des tatsächlichen Konstruktionsaufbaus. Das Georadarverfahren bildet die Straßensubstanz prinzipiell auf Basis der elektromagnetischen Änderungen an Grenzflächen ab, welche durch das auswertende Personal interpretiert werden. In diesem Zusammenhang wird das physikalische Modell eines Weg-Zeit-Modells (Laufzeit der elektromagnetischen Impulse zwischen Sende- und Empfangsantenne) in ein Weg-Tiefe-Modell umgewandelt.

Die Interpretation der Messdaten sowie die qualitative Bewertung hängen aufgrund des aktuell vorherrschenden manuellen Auswertecharakters des Messverfahrens in hohem Maße von dem Erfahrungshintergrund und dem technischen Sachverstand des auswertenden Personals ab. Dabei geht es vorrangig um die Erfassung und Bearbeitung

ingenieurtechnischer Fragestellungen, zum Beispiel im Rahmen der Erhaltungsplanung von Straßen oder Straßennetzen, sowie um straßenbautechnisches Verständnis im Allgemeinen, welches die Interpretation von Georadar-Daten erheblich erleichtert. Dies schließt die Interpretation und grundlegende Erkennung von Schichtgrenzen und deren Verläufe als auch die zweckmäßige Festlegung von Entnahmestellen für Bohrkern ein. Ebenso müssen potenzielle Schadstellen erkannt und bei einer auf die Fragestellung zugeschnittenen Expertise entsprechend Beachtung finden.

2.2 Einsatz und Erfahrungen im Ausland

Im internationalen Raum wird das Georadar als Ground Penetrating Radar (GPR) bezeichnet. Die ersten Messungen zur Untersuchung von Straßen wurden mit dem Georadar in den 1980er Jahren in Skandinavien und den USA durchgeführt. Dabei lag der Forschungsschwerpunkt auf Schichtdickenmessungen von Asphalt- und Betonbefestigungen sowie gezielten Untersuchungen von Hohlräumen unter Betonbefestigungen [MOREY, 1998; REYNOLDS, 2011]. Des Weiteren standen Betrachtungen zum Einfluss von Chloriden auf das Radarsignal [ULRIKSEN, 1982] und das Auffinden von Inhomogenitäten, wie Torflinsen, im ungebundenen Oberbau im Fokus [HÄNNINEN, 1992]. Im Bereich der Detektion von lokalen Substanzmerkmalen in Asphaltbefestigungen begannen die Untersuchungen in den darauffolgenden 1990er Jahren, wobei sich die ersten Ansätze mit der Erkennung von Querrissen und der Abschätzung von Hohlraumgehalten befassten [SAARENKETO und SCULLION, 2000].

Parallel erlebte das Georadar einen technologischen Schub, der zu einer enormen Weiterentwicklung der Messtechnik führte. So wurden in den 1990er Jahren mitunter die digitale Datenverarbeitung und die Messung mit Mehrkanalsystemen entwickelt sowie erstmalig numerischen Simulationen und Rechenmodelle für die Auswertung von Georadar-Daten aufgestellt. Darauf aufbauend wurde intensiv an der Datenverarbeitung und der Genauigkeit der Messdaten geforscht. Dies implizierte auch die Verortung und Positionskontrolle mittels Kartenwerk, da in zunehmendem Maße Georadar-Daten als Basis für weitergehende ingenieurtechnische Fragestellungen genutzt wurden. Zu diesen zählten

unter anderem auch die Erfassung von Inhomogenität im Boden sowie die Auffindung von Fremdkörpern und Aquiferen [ANNAN, 2003].

Die Weiterentwicklung der Messtechnik und die damit verbundenen Möglichkeiten für die Gewinnung von präzisen Daten sowie deren schnellere und bessere Verarbeitung und Visualisierung, war auch Gegenstand der Forschung in den 2000er Jahren. So ging die Entwicklung im Bereich der Antennen hin zu höheren Frequenzbereichen von bis zu 2.500 MHz und damit zu hochauflösenden und sehr detaillierten Radargrammen. Die kontinuierliche technologische Weiterentwicklung führte dazu, dass heute Messfrequenzen im Ultrabreitband kommerziell von bis zu 4.000 MHz bei Impulsradaren verfügbar sind [RAMOS et al., 2016].

Darüber hinaus lag der Fokus auf der Amplitudenauswertung durch Reflexion und Transmission an Grenzflächen, wie zum Beispiel Schichtgrenzen. Von besonderem Interesse war in diesem Zusammenhang auch die Erforschung von Wasser und Feuchtigkeit als Einflussgröße auf das Radarsignal [ANNAN, 2003]. Durch die höheren Frequenzbereiche der eingesetzten Antennen wurde auch an der möglichen Präzision der Messdaten geforscht, um den tatsächlichen Straßenaufbau möglichst exakt abzubilden. So ermittelten zum Beispiel AL-QADI et al. im Jahr 2003 mittlere Abweichungen zwischen dem Georadarverfahren und korrespondierenden Bohrkernen in Bezug auf die Gesamtdicke des Asphaltdecks von 2,9 %.

In den USA gilt das Georadarverfahren aufgrund der Softwareentwicklung und Verbesserung der Messtechnik seit Ende der 1990er Jahre als „moved into mainstream usage“. So wurde das Messverfahren zunehmend im Zuge der Planung von Erhaltungsmaßnahmen zur Erfassung der vorhandenen Straßensubstanz eingesetzt, wobei das Verfahren noch als relativ unsicher eingestuft wurde. Parallele Entwicklungen in Finnland haben sich vorwiegend auf die Integration des Georadars als Instrument zur Qualitätskontrolle fokussiert. Als Bewertungsgröße wurde dazu der Hohlraumgehalt im Asphaltbereich herangezogen, da dieser sowohl mit dem Georadarverfahren ermittelt als auch durch den Einsatz einer Isotopsonde gemessen werden konnte. Die Messungen fanden in diesem Zusammenhang an Flugplatzbefestigungen in Helsinki statt. Beide Anwendungsgebiete lieferten vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Genauigkeit für die gestellte Fragestellung, wobei die Prob-

lematik der Reflexionsüberlagerung dünner Schichten im Boden deutlich gemacht werden konnte. Ebenfalls wurde ausdrücklich auf die Notwendigkeit von Kalibrierungsbohrkernen hingewiesen, um eine Interpretationsgrundlage für die gewonnenen Georadar-Daten zu schaffen [SCULLION und SAARENKETO, 2002].

Verschiedene Forschungsprojekte in den USA befassten sich daraufhin in den Folgejahren mit der Frage nach den zuverlässigen Einsatzgebieten des Georadars und den dafür notwendigen Rahmenbedingungen. So ermittelten zum Beispiel AL-QADI et al. im Jahr 2005 Verfahrensgrenzen und Unsicherheitsfaktoren, welche den routinemäßigen Einsatz des Verfahrens zu dem Zeitpunkt behinderten:

1. Die Auswertung der reflektierten elektromagnetischen Impulse und Amplituden setzt ein hohes Maß an Erfahrung und ingenieurtechnischen Sachverstand voraus.
2. Die gewonnene Datenmenge ist in Abhängigkeit von der Messkonfiguration als sehr hoch einzuschätzen, wodurch eine Auswertung sehr zeitaufwendig ist und hohen Personalaufwand erfordert.
3. Um Lage und Tiefe von Objekten festzustellen, bedarf es der Kenntnis des elektromagnetischen Eigenschaftsprofils, welches frequenzabhängig ist und somit den Einsatz eines Frequenzbereichsverfahrens erfordert.
4. Die Veränderung der relativen Permittivität durch den Einfluss von Feuchtigkeit bei zunehmender Tiefe.
5. Reflexionsüberlagerungen bei dünnen Schichten in Abhängigkeit von dem Auflösungsvermögen.
6. Ein unzureichender dielektrischer Kontrast zwischen gebundenen Schichten.

Auf Basis eines Forschungsprogramms wurden in diesem Zusammenhang rund zehn Kilometer Straße mit verschiedenen Antennensystemen und Messfrequenzen zwischen 900 und 1.500 MHz untersucht. Die Kontrolle der Schichtdicken erfolgte dabei durch den Einsatz von Reflektoren, welche in den Schichtgrenzen verlegt wurden und nach Überbauen in den Messlinien des Georadars lagen. Die Ergebnisse wurden als vielversprechend eingestuft, da der relative Fehler zwischen Georadar und der Schichtdickenermittlung am Bohrkern, wie schon Jahre zuvor, mit ca. 3,0 % beziffert wurde. Darüber

hinaus wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den abgeschätzten Schichtdicken und den Veränderungen der elektromagnetischen Eigenschaften über die Bandbreite der Messfrequenzen festgestellt.

Bis heute ist die mögliche Genauigkeit des Georadarverfahrens ein immer wiederkehrender Forschungsschwerpunkt in verschiedensten Forschungsprojekten gewesen. Aufgrund der immer unterschiedlich eingesetzten Messtechniken und des variierenden Umfangs der Messdaten sind allerdings keine eindeutigen Schlussfolgerungen aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen zu ziehen. Für den vorliegenden Anwendungsfall können näherungsweise die Untersuchungsergebnisse von KHAMZIN et al. aus dem Jahr 2017 herangezogen werden. Auf zwei längeren Teststrecken wurden eine begrenzte Anzahl an Bohrkernen entnommen und mit den gewonnenen Georadar-Daten verglichen, wobei eine mit dem vorliegenden Anwendungsfall vergleichbare Messtechnik (Kapitel 3.4.1) verwendet wurde. Dabei wurden Abweichungen zwischen Bohrkernen und unkalibrierten Georadar-Daten von bis zu 10,0 % und Abweichungen zwischen Bohrkernen und kalibrierten Georadar-Daten von bis zu 5,0 % ermittelt und als vertretbar eingestuft.

Im Zuge der Feststellung von lokalen Substanzmerkmalen nutzten SEBESTA et al. im Jahr 2006 das Georadarverfahren in Kombination mit der Oberflächenthermografie zur Feststellung von Entmischung und Hohlraumstrukturen im Asphaltoberbau. Anhand mehrerer Neubaustrecken wurde die Möglichkeit der Korrelation zwischen Temperaturunterschieden und Inhomogenität im Asphaltmischgut untersucht. Dazu wurden für die Messungen mit dem Georadar Hornantennen mit drei Messkanälen eingesetzt. Im Zuge der Auswertung konnte festgestellt werden, dass Temperaturunterschiede von rund 25,0 °F (Δ ca. 3,9 °C) an der Asphaltoberfläche Anzeichen für örtliche Entmischung und damit für einen höheren Hohlraumgehalt waren. Auf Basis der Georadarmessungen wurden in diesem Zusammenhang Unterschiede in Abhängigkeit von der Körnung des Asphaltmischgutes ausgewiesen. So sollten im grobkörnigen Bereich Differenzen in der relativen Permittivität von $\pm 0,8$ und im feinkörnigen Bereich von $\pm 0,4$ näher untersucht werden. Eine vergleichbare Studie bezüglich des Zusammenhangs zwischen dem Hohlraumgehalt im Asphalt und der Permittivität unter Berücksichtigung der Asphalttemperatur wurde auch von AL-QADI et al. im

Jahr 2011 durchgeführt. Demnach ist der Zusammenhang allerdings weniger durch Temperatureinflüsse sondern vielmehr klassisch durch die Verdichtungsarbeit gegeben. So nimmt die relative Permittivität grundsätzlich mit höherer Dichte zu. Eine Korrelation zwischen der Verdichtungsarbeit und Amplitudenausprägung kann demnach als Anhaltspunkt dafür genommen werden, wann die maximale Lagerungsdichte im Asphalt erreicht ist. Dies entspricht einem relativ konstanten Niveau der relativen Permittivität während der Verdichtung. Den grundlegenden Zusammenhang zwischen der relativen Permittivität und dem Hohlraumgehalt in einer Asphaltsschicht untersuchten auch MASER und CAR-MICHAEL, 2015. Diese wiederum konnten in ihren Studien keine signifikante Korrelation erkennen. So ergaben stationsgetreue Auswertungen zwischen EDV-gestützten Berechnungen der relativen Permittivität im Vergleich mit Hohlraumgehalten an entnommenen Bohrkernen eine Gleichverteilung der Messwerte. Eine Korrelation konnte ausschließlich in Abhängigkeit von der Schichtdicke ermittelt werden. So stieg das Bestimmtheitsmaß der durchgeführten linearen Regressionen mit abnehmender Schichtdicke. Die relative Permittivität nahm in diesem Zusammenhang tendenziell mit abnehmendem Hohlraumgehalt zu.

Es gilt anzumerken, dass in den meisten der bis dahin durchgeführten Forschungsarbeiten der Asphaltoberbau als homogener und isotroper Körper angenommen und somit ein konstantes elektromagnetisches Eigenschaftsprofil angesetzt wurde [HARRIS et al., 2004; AL-QADI et al., 2005; LOIZOS und PLATI, 2007; ASTM International E17 Committee, 2010]. Die Straßensubstanz bestand somit ausschließlich aus einem zwei- oder dreischichtigen Modell (Bild 2). Die Zielsetzungen der Forschungsarbeiten lassen sich daher auf die Bestimmung der Gesamtmächtigkeit des Asphaltoberbaus sowie die daraus ableitbare Charakterisierung der Straßenkategorie und Dimensionierung der Straße eingrenzen.

Ein bis dahin neuer Forschungsaspekt wurde im Jahr 2009 durch die „Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt“ (EMPA) in der Schweiz anhand einer internationalen Studie aufgegriffen [HUGENSCHMIDT, 2009]. Es wurde der Zusammenhang zwischen dem elektromagnetischen Eigenschaftsprofil von Asphaltstraßen und dem Straßenalter durchgeführt. Anhand von Messdaten aus Finnland, Griechenland und der Schweiz wurde in diesem Zusammenhang eine Ganglinie hinsicht-

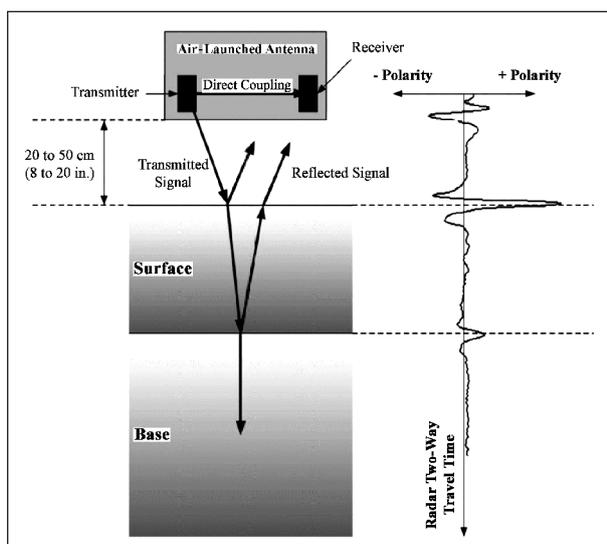


Bild 2: Schematische Funktionsweise des Georadars und Einteilung der Straßensubstanz [ASTM International E17 Committee, 2010]

lich der relativen Permittivität über die Lebensdauer einer Straße entwickelt, welche auf den Einflüssen von Wasser und Frost basierte.

Vor dem Hintergrund der Einführung von technischen Regelwerken und allgemeinen Standardisierungen zum Georadarverfahren wurden von der „American Society for Testing Materials“ (ASTM) in den Jahren 2010 und 2011 erste technische Standards veröffentlicht. Die verantwortlichen Komitees E17 und D18 brachten zwei erste internationale Standards mit den Titeln „Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar“ und „Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation“ heraus. Aufgrund des originären freiwilligen Charakters dieser Standards handelt es sich in erster Linie um Wissensdokumente, welche mit dem im Jahr 2016 in Deutschland veröffentlichten Arbeitspapier der FGSV zu vergleichen sind. Der Zweck war die Vereinheitlichung der Durchführung von Georadarmessungen bei geophysikalischen Fragestellungen, wobei dies als eine grundlegende Übersicht zu verstehen ist und keine detaillierten Informationen hinsichtlich der tatsächlichen Durchführung einer Georadarmessung oder der Interpretation der Georadar-Daten beinhaltet. Auf Basis einer Vielzahl von Forschungsergebnissen wurden Zusammenhänge und Quantifizierungen einzelner Messgrößen zusammengetragen. Ein Vergleich beider Wissensdokumente zeigt viele Parallelen in den einzelnen Teilprozessen der Georadarmessung auf. Dazu zählen zum Beispiel die Auswahl der nutzbaren Antennenfrequenz sowie das Auflösungsvermögen

und die Datenaufbereitung mittels Filter- oder Verstärkungsfunktionen zur besseren Darstellung der Messdaten.

3 Grundlagen der Verfahrenstechnik

3.1 Messprinzip

Das Messprinzip des Georadarverfahrens basiert zumeist auf der Aussendung von kurzen hochfrequenten elektromagnetischen Impulsen mit einer bestimmten Antennenmittelfrequenz f_c (häufig als f_0 bezeichnet)¹ und Frequenzbandbreite B durch einen Transmitter (Sendeantenne T_x) und dem Empfang derer Reflexionen an einem Receiver (Empfängerantenne R_x) [ALTEKÖSTER, 2004]. Das Georadar wird daher auch als Impulsradar oder Impuls-Echo-Verfahren bezeichnet [FGSV Arbeitspapier Nr. 443A, 2016]. Alternativ findet das Continuous Wave Radar (CW) Anwendung, wobei elektromagnetische Wellen zeitlich konstant abgestrahlt werden [WEISS, 2009; SUGAK, 2016]. Mangels Informationen hinsichtlich der Entfernung von Reflektoren werden CW-Radare frequenzmoduliert (FMCW), sodass eine Entfernungsabschätzung durch eine Differenzmessung zwischen der Frequenz des abgestrahlten Signals und der Frequenz des empfangenen Signals ermöglicht wird, wobei die Frequenz stetig mit der Zeit verändert wird (Stepped Frequency (SF)) [SAUNDERS, 1990; MANACORDA et al., 2015].

Zur Detektion der Straßensubstanz wird eine quasi-kontinuierliche Messung angestrebt, wobei Transmitter und Receiver mit gleichbleibendem Abstand zueinander mit möglichst konstanter Geschwindigkeit über den Untersuchungsabschnitt bewegt werden [ALTEKÖSTER, 2004].

In der Regel stellt die Laufzeit der abgestrahlten Impulse (in [ns]) die wesentliche direkte Messgröße dar, woraus die wesentliche Zielgröße, der zurückgelegte Weg der Impulse, berechnet wird. Dieser wird benötigt, um die Lage und die Tiefe von Reflektoren in der Straßensubstanz zu ermitteln. Da der zurückgelegte Weg direkt aus der gemessenen Laufzeit bestimmt wird, handelt es sich um Radar-

¹ Im Folgenden ausschließlich als f definiert.

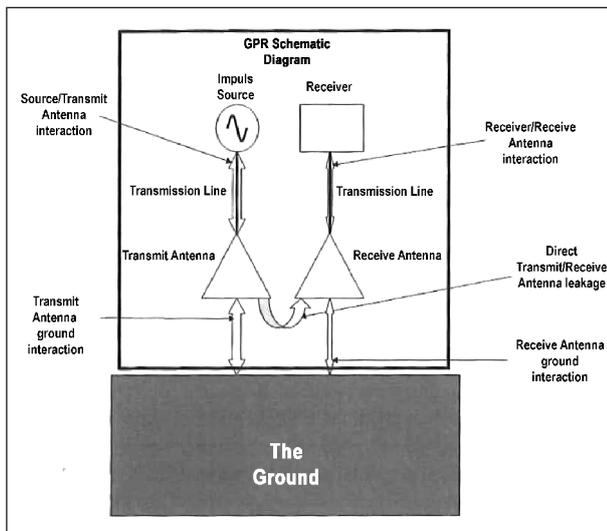


Bild 3: Prinzipskizze eines im Zeitbereich arbeitenden Georadars [MANACORDA et al., 2015]

systeme, welche zeitabhängig (time domain) arbeiten (Bild 3).

Alternativ können Systeme genutzt werden, welche frequenzabhängig arbeiten (frequency domain). Dabei wird der zurückgelegte Weg mittels der Frequenzänderung pro Zeit ermittelt [MANACORDA et al., 2015].

Neben der Laufzeit ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit in dem durchstrahlten Medium eine wesentliche Kenngröße. Da diese vom elektromagnetischen Eigenschaftsprofil des jeweiligen Mediums abhängt, handelt es sich nicht um eine konstante Größe, sondern variiert von Stoff zu Stoff (Kapitel 3.3.2). Referenzgröße ist in diesem Zusammenhang die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum c_0 (Lichtgeschwindigkeit) (Kapitel 3.2.1).

An den Reflektoren im Untersuchungsmedium wird ferner die Amplitude des Impulses gemessen und als weitere direkte Messgröße ausgegeben. Die Größe der Amplitude lässt Rückschlüsse auf die Energiemenge zu, welche am Reflektor zurückgeworfen und an der Empfangsantenne aufgenommen wird. Grundsätzlich stellt jeder Reflektor eine Grenzfläche zwischen zwei Materialien dar, an der sich das elektromagnetische Eigenschaftsprofil ändert [Geophysical Survey Systems Inc., 2015a]. Neben der Reflexion werden die Impulse an der Grenzfläche zusätzlich diffraktiert und gebrochen, wobei der nicht reflektierte Anteil des Impulses in gedämpfter Form durch die Grenzfläche hindurch transmittiert [REYNOLDS, 2011]. Dies wiederholt sich an tieferliegenden Grenzflächen erneut, bis die Impulse durch die Dämpfungs- und Streueffekte der

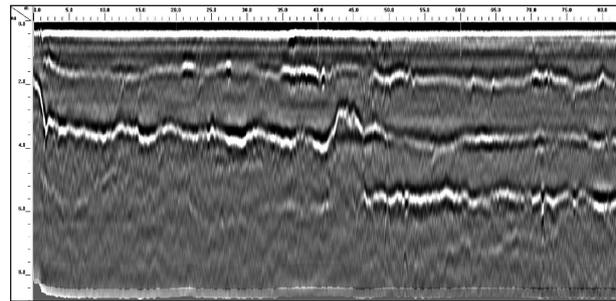


Bild 4: Radargramm im linearen Graustufenformat der Messlinie 3 der Objektebene (Display Gain = 30, $f = 2.000 \text{ MHz}$)

durchstrahlten Medien derart abgeschwächt sind, dass eine Unterscheidung vom Signalrauschen nicht mehr möglich ist [SCHÖN, 2015]. Dabei ist die maximal mögliche Eindringtiefe zu berücksichtigen, welche von der eingesetzten Messfrequenz abhängt (Kapitel 3.2.3).

Das Ergebnis der Georadarmessung ist der Radar-scan, welcher entweder als Funktion der Signalamplitude über die Signallaufzeit (O-Scope oder Wiggle-Trace) oder als Farbbalken, wobei die Signalamplitude farbcodiert wird, ausgegeben wird. Eine Aneinanderreihung der auf diese Weise dargestellten Impulse erzeugt das sogenannte Radargramm (B-Bild), welches das Untersuchungsmedium im Längs- oder Querschnitt abbildet. Im Bereich des Straßenwesens wird vorzugsweise das farbcodierte Radargramm verwendet, welches die Straßensubstanz entlang der Messlinien als Längsprofil zumeist in einem linearen Graustufenformat abbildet (Bild 4).

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Darstellung der Georadar-Daten als Einzelspur (A-Bild) oder als Zeitscheibe (C-Bild). Das A-Bild besteht dabei aus einem einzelnen Scan an einem definierten Punkt, welcher als Wiggle-Trace oder Farbbalken dargestellt werden kann. Die Zeitscheibe wiederum ist eine 3D-Darstellung, welche aus mehreren parallelen und kreuzenden Messlinien besteht und dadurch nicht nur Längsschnitte, sondern auch Tiefenschnitte, als horizontale Schnittebenen (Slices), ermöglicht werden [DGZfP Merkblatt B 10, 2008].

Die Reflexion der elektromagnetischen Impulse an Grenzflächen besteht in der Regel aus drei Halbwellen, deren Abfolge und Polarisation vom dielektrischen Kontrast der benachbarten Schichten sowie von dem genutzten Antennensystem abhängt. Dabei ist die mittlere Halbwelle konträr zu den beiden weiteren Halbwellen polarisiert und umfasst

das Amplitudenmaximum der Grenzfläche. Das Amplitudenmaximum ist positiv polarisiert, wenn ϵ_r der Schicht unterhalb der Grenzfläche größer ist als oberhalb der Grenzfläche. Bei einem Übergang in ein Medium mit niedrigerer ϵ_r tritt eine entsprechende Umkehrung der Polarisationsrichtung der Halbwellen auf [FUNK et al., 1996].

Neben der Untersuchung von Straßen wird das Georadarverfahren im Ingenieurwesen und weiteren Fachdisziplinen auf vielfältige Weise eingesetzt, wobei die gezielte Auffindung von Grenzflächen, welche auf Materialwechsel hindeuten, von großer Bedeutung ist [ANNAN, 2003; ALTEKÖSTER, 2004]:

- Geologische und geophysikalische Fragestellungen, wie zum Beispiel Damm- und Baugrunderkundung
- Altlasten- oder Kampfmittelauffindung
- Archäologische und geologische Prospektion
- Frosttiefen
- Trassenerkundung von Leitungen
- Bewehrungserkundung bei Betonbauteilen
- Zustandserfassung von Ingenieurbauwerken

3.2 Physikalische Grundlagen

3.2.1 Physikalische Größen

Die physikalischen Grundlagen des Georadarverfahrens beruhen auf dem Maxwell-Prinzip von elektromagnetischen Impulsen in Form von Transversalwellen (Schwingung der Welle steht senkrecht zur Ausbreitungsrichtung) [FÖRSTER und HOTHAN, 2001] in homogenen, isotropen und nicht- oder schwachleitenden Medien [FUNK et al., 1996]. Für die Herleitung der Maxwell-Gleichungen wird auf die einschlägige Literatur, zum Beispiel HURAY, 2011 oder DONNEVERT, 2015, verwiesen. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Wellen in dem jeweiligen Medium ausbreiten, hängt von dessen elektromagnetischen Eigenschaften ab.

Die wesentliche Kenngröße ist die relative Permittivität ϵ_r als dimensionsloser Quotient aus der Permittivität des jeweiligen Mediums ϵ bezogen auf die elektrische Feldkonstante ϵ_0 (Permittivität des Vakuums) nach (3.1).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.1)$$

Dabei wird die elektrische Feldkonstante ϵ_0 nach (3.2) berechnet.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c_0^2 \times \mu_0} \quad (3.2)$$

Mit

ϵ_0 : elektrische Feldkonstante
($8,854187 \cdot 10^{-12}$ F/m)

c_0 : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
(299.792.458 m/s)

μ_0 : magnetische Feldkonstante ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ N/A²)

Die Permittivität ϵ ist der Proportionalitätsfaktor nach (3.3) [KILIAN und WEBER, 2003] zwischen den vektoriellen Größen der elektrischen Feldstärke \vec{E} und der dielektrischen Ladungsverschiebung \vec{D} in einem nicht- oder schwachleitenden, aber elektrisch polarisierbarem Medium (Dielektrikum), welches einem äußeren elektrischen Feld ausgesetzt ist [MARINESCU, 2012].

$$\vec{D} = \epsilon \times \vec{E} \quad (3.3)$$

Die elektrische Leitfähigkeit σ nach (3.4) beschreibt als Proportionalitätsfaktor den Zusammenhang zwischen den vektoriellen Größe der elektrischen Stromdichte \vec{J} und der elektrischen Feldstärke \vec{E} die Fähigkeit eines isotropen Stoffes den elektrischen Strom zu leiten [MARINESCU, 2012].

$$\vec{J} = \sigma \times \vec{E} \quad (3.4)$$

Der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit ist der spezifische Widerstand ρ in Ωm .

Die elektrische Leitfähigkeit der meisten im Straßenwesen verwendeten Baumaterialien wird im Wesentlichen durch den Wassergehalt bestimmt [DANIELS, 2007]. In der Regel ist allerdings von trockenen, nichtmetallischen und damit nicht- bzw. schwachleitenden Baustoffen auszugehen, welche einen erheblichen spezifischen Widerstand aufweisen, sodass die elektrische Leitfähigkeit vernachlässigt werden darf. Die elektrische Leitfähigkeit von Asphalt im trockenen Zustand wird beispielsweise in der gängigen Literatur näherungsweise mit $< 10^{-3}$ mS/m angegeben [DGZfP Merkblatt B 10, 2008].

Die relative magnetische Permeabilität μ_r beschreibt als dimensionsloser Quotient das Verhältnis aus magnetischer Permeabilität μ und magnetischer Feldkonstante μ_0 nach (3.5).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.5)$$

Die Permeabilität μ ist dabei der Proportionalitätsfaktor zwischen den vektoriellen Größen der magnetischen Flussdichte \vec{B} und der magnetischen Feldstärke \vec{H} [FÖRSTER und HOTHAN, 2001] nach (3.6). Sie ist das Maß der Magnetisierung eines Stoffes, welcher einem magnetischen Feld ausgesetzt ist [MARINESCU, 2012].

$$\vec{B} = \mu \times \vec{H} \quad (3.6)$$

Die im Straßenwesen verwendeten Baumaterialien zählen in der Regel zu den nichtferromagnetischen Medien [MARINESCU, 2012] deren relative magnetische Permeabilität vernachlässigt werden darf ($\mu_r \approx 1,00$) [DGZfP Merkblatt B 10, 2008]. Dies entspricht dem Verhalten eines Magnetfeldes in der Luft. Die magnetische Flussdichte und die magnetische Feldstärke verhalten sich dadurch zueinander linear.

3.2.2 Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Das Georadarverfahren beruht auf der Abstrahlung elektromagnetischer Impulse in Form von Transversalwellen in ein Untersuchungsmedium. Die Ausbreitung im Untersuchungsmedium basiert auf der Ausbreitungsgeschwindigkeit, welche von den elektromagnetischen Eigenschaften der durchstrahlten Medien abhängt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum entspricht der Geschwindigkeit des Lichtes c_0 [FÖRSTER und HOTHAN, 2001] ((3.7) umgestellt nach (3.2)) [DANIELS, 2007].

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \times \epsilon_0}} \quad (3.7)$$

Die elektromagnetischen Impulse werden in den durchstrahlten Medien gedämpft und abgeschwächt. Dies erfolgt einerseits sprunghaft an Grenzflächen durch die Reflexion eines bestimmten Signalanteils und andererseits durch das durchstrahlte Medium selbst. Dabei ist die elektrische Leitfähigkeit σ der wesentliche Dämpfungsfaktor. Näherungsweise wird im Straßenwesen in diesem Zusammenhang von verlustarmen Medien ausgegangen, deren elektrische Leitfähigkeit als sehr gering einzustufen ist. Da die relative magnetische Permeabilität μ_r ebenfalls vernachlässigt werden darf, hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen vordringlich von der relativen Permittivität ϵ_r ab. Unter der Annahme einer quasi senkrechten Wellenausbreitungsrichtung kann der vereinfachte Zusammenhang nach (3.8) angewendet werden.

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.8)$$

Mit

v : Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Impulse im Medium in cm/ns

c_0 : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (299.792.458 m/s)

ϵ_r : relative Permittivität (dimensionslos)

Neben der Ausbreitungsgeschwindigkeit verändert sich durch die abweichenden elektromagnetischen Eigenschaften die Länge der elektromagnetischen Welle im Medium. In Vakuum gilt der allgemeine physikalische Zusammenhang nach (3.9) [DANIELS, 2007].

$$c_0 = \lambda_0 \times f \quad (3.9)$$

Mit

c_0 : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (299.792.458 m/s)

λ_0 : Länge der elektromagnetischen Welle im Vakuum in m

f : Frequenz der elektromagnetischen Welle in Hz ($\triangleq 1/s$)

Im Untersuchungsmedium verkürzt sich die Wellenlänge und ist durch den Brechungsindex n abzumindern (3.10), welcher sich aus der relativen Permittivität ϵ_r und der relativen magnetischen Permeabilität μ_r zusammensetzt (3.11).

$$\lambda = \lambda_0 \times \frac{1}{n} \quad (3.10)$$

Mit

λ : Länge der elektromagnetischen Welle im Medium in m

λ_0 : Länge der elektromagnetischen Welle im Vakuum in m

n : Brechungsindex nach (3.11)

$$n = \sqrt{\epsilon_r \times \mu_r} \quad (3.11)$$

An Grenzflächen mit einem Wechsel des elektromagnetischen Eigenschaftsprofils werden die abgestrahlten elektromagnetischen Impulse diffraktiert, gebrochen und reflektiert. Dabei bestimmt der dielektrische Kontrast als Verhältnis der relativen Permittivitäten der angrenzenden Medien den Anteil des Signals, welcher reflektiert und welcher ge-

brochen wird. Der gebrochene Anteil transmittiert durch die Grenzfläche hindurch und dringt geschwächt weiter in das Untersuchungsmedium ein. Das Reflexionsverhalten an der Grenzfläche lässt sich durch die Einschätzung des Reflexionskoeffizienten RI und Transmissionskoeffizienten TI beurteilen (Bild 5).

Gemäß (3.12) zeigt der Reflexionskoeffizient den reflektierten Anteil des Signals an einer Grenzfläche auf. Der Reflexionskoeffizient setzt in diesem Zusammenhang die relative Permittivität der durchstrahlten Medien ober- und unterhalb der Grenzfläche in Bezug [DANIELS, 2007].

$$RI = \frac{\sqrt{\epsilon_{r,i}} - \sqrt{\epsilon_{r,i+1}}}{\sqrt{\epsilon_{r,i}} + \sqrt{\epsilon_{r,i+1}}} \quad (3.12)$$

Mit

RI: Reflexionskoeffizient der i-ten Grenzfläche (dimensionslos)

$\epsilon_{r,i}$: relative Permittivität des Mediums oberhalb der i-ten Grenzfläche (dimensionslos)

$\epsilon_{r,i+1}$: relative Permittivität des Mediums unterhalb der i-ten Grenzfläche (dimensionslos)

Je größer der dielektrische Kontrast in der Grenzfläche ist, desto größer ist der Betrag des Reflexionskoeffizienten und desto ausgeprägter ist die Amplitude des Signals einzuschätzen. Der Reflexionskoeffizient nimmt dabei einen positiven Wert an, wenn die relative Permittivität der oberen Schicht größer als die der unteren Schicht ist. Entsprechend wird ein negativer Wert angenommen, wenn die relative Permittivität der unteren Schicht größer als

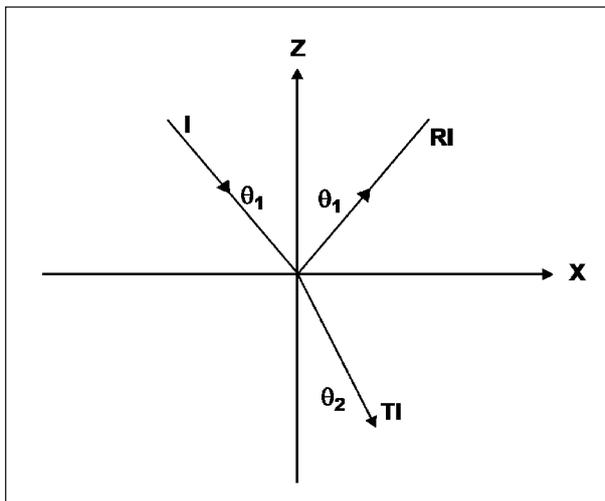


Bild 5: Schematische Darstellung der Reflexions- und Transmissionskoeffizienten an einer Grenzfläche [ANNAN, 2003]

die der oberen Schicht ist. Dies hat ebenfalls direkte Auswirkungen auf die Signalpolarisation sowie die Phase (Schwingungsnullpunkt) der an der Schichtgrenze reflektierten Welle [FUNK et al., 1996].

Der Transmissionskoeffizient ist nach (3.13) zu ermitteln [DONG et al., 2016]:

$$TI = \frac{2 \times \sqrt{\epsilon_{r,i}}}{\sqrt{\epsilon_{r,i}} + \sqrt{\epsilon_{r,i+1}}} = 1 + RI \quad (3.13)$$

Mit

TI: Transmissionskoeffizient der i-ten Grenzfläche (dimensionslos)

$\epsilon_{r,i}$: relative Permittivität des Mediums oberhalb der i-ten Grenzfläche (dimensionslos)

$\epsilon_{r,i+1}$: relative Permittivität des Mediums unterhalb der i-ten Grenzfläche (dimensionslos)

Durch die Diffraction und Brechung verändert sich gleichermaßen der Ausbreitungswinkel des Impulses gegen die z-Achse im Medium von θ_1 zu θ_2 (Bild 6).

Es gilt das Snelliussche Brechungsgesetz [HENTSCHEL, 2001] nach (3.14) [ANNAN, 2003].

$$k_1 \times \sin \theta_1 = k_2 \times \sin \theta_2 \quad (3.14)$$

Mit

k_1 : Kreiswellenzahl des Mediums oberhalb der Grenzfläche nach (3.15)

k_2 : Kreiswellenzahl des Mediums unterhalb der Grenzfläche nach (3.15)

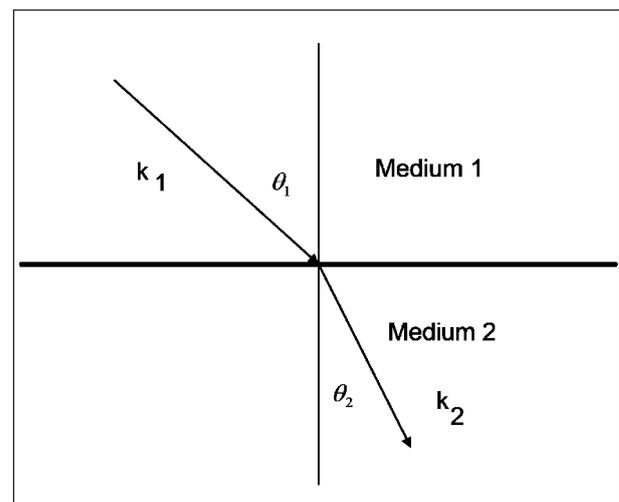


Bild 6: Richtungsänderung eines elektromagnetischen Impulses an einer Grenzfläche (k = Kreiswellenzahl) [ANNAN, 2003]

θ_1 : Ausbreitungswinkel des elektromagnetischen Impulses im Medium 1

θ_2 : Ausbreitungswinkel des elektromagnetischen Impulses im Medium 2

$$k = \frac{2 \times \pi}{\lambda} \tag{3.15}$$

Da es sich bei den abgestrahlten elektromagnetischen Impulsen um Transversalwellen handelt, deren Schwingungsrichtung orthogonal zur Ausbreitungsrichtung steht, sind diese Wellen linear polarisierbar. Dies gilt in gleichem Maße für die an Grenzflächen reflektierten Wellen. In Abhängigkeit von der Schwingungsrichtung, Phasenlänge und Phasenverschiebung der Welle kann die Polarisation dabei positiv oder negativ sein [KUCHLING, 2007].

3.2.3 Detektionstiefe und Auflösungsvermögen

Die Detektionstiefe und das Auflösungsvermögen des Georadars werden maßgeblich durch die Messfrequenz der genutzten Antennen und damit durch die Wellenlänge λ der abgestrahlten elektromagnetischen Impulse sowie deren Impulsdauer bestimmt. Gemäß dem Merkblatt B 10 der DGZfP liegt das Auflösungsvermögen unter günstigen Bedingungen näherungsweise zwischen $\lambda/8$ und $\lambda/4$. Unter praxishen Bedingungen und bei Berücksichtigung potenzieller äußerer Störeinflüsse, wie elektromagnetische Störquellen oder Feuchtigkeit im Oberbau, ist von einem Auflösungsvermögen von $\lambda/2$ auszugehen [FÖRSTER und HOTHAN, 2001]. So führt zum Beispiel ein erhöhter Feuchtegehalt im Medium zu vermehrten Dämpfungseffekten und damit zu einer erheblichen Reduzierung der möglichen Detektionstiefe. Aus (3.9) lässt sich prinzipiell der Grundsatz ableiten, dass durch die Nutzung einer höheren Messfrequenz eine verringerte Detektionstiefe und im Umkehrschluss ein verbessertes vertikales Auflösungsvermögen ermöglicht wird (Tabelle 1). Dies ist auf die Verkürzung der Wellenlänge

bei einer höheren Messfrequenz zurückzuführen [FUNK et al., 1996].

Das Auflösungsvermögen des Georadars definiert im Allgemeinen das Potenzial Substanzmerkmale und Grenzflächen in den Georadar-Daten getrennt zu erfassen und darzustellen [FUNK et al., 1996]. Dabei wird zwischen der vertikalen (range) und lateralen (angular) Auflösung unterschieden (Bild 7).

Das vertikale Auflösungsvermögen beschreibt die Unterscheidbarkeit von vertikal angeordneten Reflektoren oder Grenzflächen, welche noch getrennt im Radargramm aufgelöst werden können [DGZfP Merkblatt B 10, 2008]. Dieses hängt maßgeblich von einem günstigen Verhältnis zwischen der zeitlichen Trennung der Reflexionen dieser Grenzflächen innerhalb eines Impulses, der Impulsdauer τ und der Ausbreitungsgeschwindigkeit v der elektromagnetischen Impulse im Medium ab. Dabei sollten die Reflexionen einen zeitlichen Versatz von mindestens $\tau/2$ aufweisen, um getrennt erkannt werden zu können [ANNAN, 2003; REYNOLDS, 2011]. Ansonsten findet eine Überlagerung der Reflexionen statt und die untere Grenzfläche wird nicht korrekt aufgelöst. Der minimale Abstand kann nach (3.16) berechnet werden [FGSV Arbeitspapier Nr. 443A, 2016].

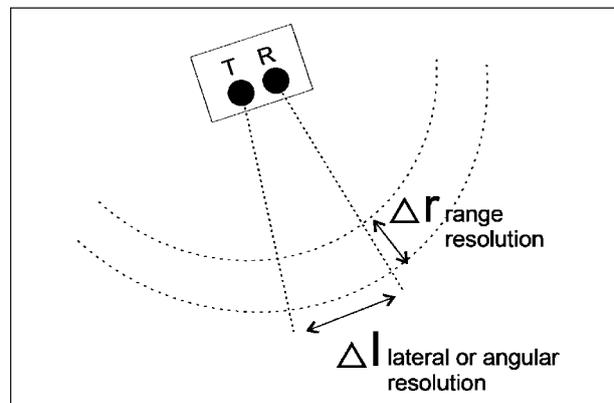


Bild 7: Unterscheidung und Orientierung der Auflösungsrichtungen des Georadars [ANNAN, 2003]

Messfrequenz in MHz	Wellenlänge in m mit $\epsilon_r \approx 9$ und $\mu_r \approx 1$	Detektionstiefe in m	Vertikales Auflösungsvermögen in cm
300	0,333	$\approx 6,0$	$\approx 10,0$
800	0,125	$\approx 0,8 - 1,0$	$\approx 3,0 - 4,0$
1.000	0,100	$\approx 1,0$	$\approx 2,5$
2.000	0,05	$\approx 0,4 - 0,75$	$\approx 1,25$
2.700	0,038	$\approx 0,1 - 0,2$	$\approx 1,0$

Tab. 1: Zusammenhang zwischen der Messfrequenz und den messtechnischen Parametern Detektionstiefe und Auflösungsvermögen [zusammengestellt nach ENDOM et al., 2008 und STRYK et al., 2015]

$$\Delta r = \frac{c_0 \times \tau}{2 \times \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.16)$$

Mit

Δr : Abstand zwischen zwei Reflektoren oder Grenzflächen (hier: Dicke einer Schicht in der Straßensubstanz) in cm

c_0 : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (299.792.458m/s)

τ : Impulsdauer in ns

ϵ_r : relative Permittivität des durchstrahlten Mediums (dimensionslos)

Die Impulsdauer ist in diesem Zusammenhang dispersiv, wobei ein höherer Frequenzbereich in der Regel eine kürzere Impulsdauer aufweist [STRYK et al., 2015].

Die Ermittlung der Tiefe einer Grenzfläche oder eines Reflektors basiert in diesem Zusammenhang auf der Laufzeit². Unter Nutzung des vereinfachten Ansatzes zur Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium nach (3.8) kann der Abstand zwischen einem Reflektor oder einer Grenzfläche und der Antenne näherungsweise nach (3.17) berechnet werden [DGZfP Merkblatt B 10, 2008].

$$d = \frac{v \times t}{2} \quad (3.17)$$

Mit

d : Tiefe des Reflektors oder der Grenzfläche in cm

v : Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Impulse im Medium in cm/ns

t : Signallaufzeit in ns

Dieser Berechnungsansatz unterliegt der Annahme, dass eine näherungsweise senkrechte Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Impulse vorliegt und der Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne (Offset) derart gering ist, dass er vernachlässigt werden darf [DGZfP Merkblatt B 10, 2008]. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass zur Bestimmung der Tiefe des Reflektors oder der Grenzfläche die halbe Signallaufzeit anzusetzen ist.

Der Abstand zwischen zwei Reflektoren oder Grenzflächen, wie zum Beispiel die Dicken einzelner Schichten in der Straßensubstanz, sind in diesem Zusammenhang aus den Tiefen der Grenzflä-

chen abgeleitete Größen. Bei der Interpretation von Schichtdicken gilt es daher, durch die Differenz benachbarter Reflexionen von Grenzflächen, auf die Dicke der dazwischenliegenden Schicht zu schließen. Dazu werden die Signallaufzeiten an der Oberseite (t_i) und Unterseite (t_{i+1}) einer Schicht ermittelt, wodurch t in Δt transformiert wird (3.18).

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i \quad (3.18)$$

Mit

Δt : Differenz der Signallaufzeit der Grenzflächen ober- und unterhalb der Schicht i in ns

t_i : Signallaufzeit der Grenzfläche oberhalb der betrachteten Schicht i in ns

t_{i+1} : Signallaufzeit der Grenzfläche unterhalb der betrachteten Schicht i in ns

Neben dem vertikalen Auflösungsvermögen definiert das laterale Auflösungsvermögen die getrennte Darstellung von Objekten im Medium in horizontaler Ausrichtung. Die laterale Richtung steht in diesem Zusammenhang orthogonal zur Bewegungsrichtung der Messantenne sowie zur Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Impulse [FÖRSTER und HOTHAN, 2001].

Die wesentliche Definitionsgröße ist dabei die Kreisfläche der ersten Fresnelzone, deren Radius im Wesentlichen von der genutzten Messfrequenz respektive Wellenlänge sowie dem Abstand zwischen dem Reflektor und der Sendeantenne abhängt. Je größer der Abstand ist, desto stärker wird der Impuls durch Streu- und Dämpfungseffekte beeinträchtigt [ANNAN, 2011] und desto größer ist die erste Fresnelzone. Ist der laterale Abstand benachbarter Objekte bei vergleichbarer Signallaufzeit kleiner als die Fresnelzone, können diese aufgrund von Reflexionsüberlagerungen und Beugungseffekten [FUNK et al., 1996] nicht oder nur eingeschränkt voneinander unterschieden werden. Der horizontale Mindestabstand benachbarter Objekte berechnet sich hierbei nach (3.19) [ALTEKÖSTER, 2004].

$$R = \sqrt{2 \times d \times \lambda + \frac{\lambda^2}{4}} \quad (3.19)$$

Mit

R : Radius der ersten Fresnelzone entspricht dem horizontalen Mindestabstand benachbarter Objekte in m

² Im Folgenden als Signallaufzeit bezeichnet.

- d: Abstand zwischen Reflektor und Transmitter in m
- λ : Wellenlänge des elektromagnetischen Impulses in m

3.3 Definition von messtechnischen Größen

3.3.1 Messsystem

Das Messsystem des Georadars besteht im Grundsatz aus drei wesentlichen Komponenten [Geophysical Survey Systems Inc., 2015a]:

1. Einer zentralen Kontroll- und Verarbeitungseinheit (Radarsteuerung).
2. Einem Antennensystem aus einer oder mehrerer Messantennen.
3. Einem Positionierungssystem zur Verortung der Messdaten.

Darüber hinaus werden zur Quantisierung der analog aufgezeichneten Signale ein Analog-Digital-Umsetzer (ADU) und zur weitergehenden EDV-gestützten Datenverarbeitung entsprechende Ausgabemedien zur Datenvisualisierung während der Georadarmessung sowie zum Datenoutput genutzt (Bild 8).

Die EDV-gestützte Datenverarbeitung sollte eine handelsübliche Verarbeitungssoftware für Georadar-Daten umfassen, damit diese in ingenieurtechnisch interpretierbare Formate gebracht werden können. Im Rahmen des Post-Processings (Kapitel 3.4.2) kann ferner auf textverarbeitende und tabellenkalkulatorische Software zurückgegriffen werden, um eine Nachbearbeitung und Visualisierung der Messdaten zu ermöglichen. Dadurch wird sichergestellt, dass ein breites Spektrum an Anwendern vorhanden ist und das Messergebnis ingenieurtechnisch genutzt werden kann.

Das Messsystem umfasst in einer detaillierten Betrachtung diverse Messparameter, welche in Abhängigkeit von der Fragestellung und Zielsetzung sowie der Messumgebung, aus Untersuchungsmedium, Detektionstiefe und Messgeschwindigkeit zu quantifizieren sind. Die einzelnen Messparameter unterscheiden sich in diesem Zusammenhang hinsichtlich ihres Bezugspunktes. So muss zwischen Parametern unterschieden werden, welche direkten Einfluss auf die Messdaten ausüben und welche, die die Durchführung der Georadarmessung betreffen.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die wesentlichen messtechnischen Parameter zum Messsystem [Geophysical Survey Systems Inc., 2015d].

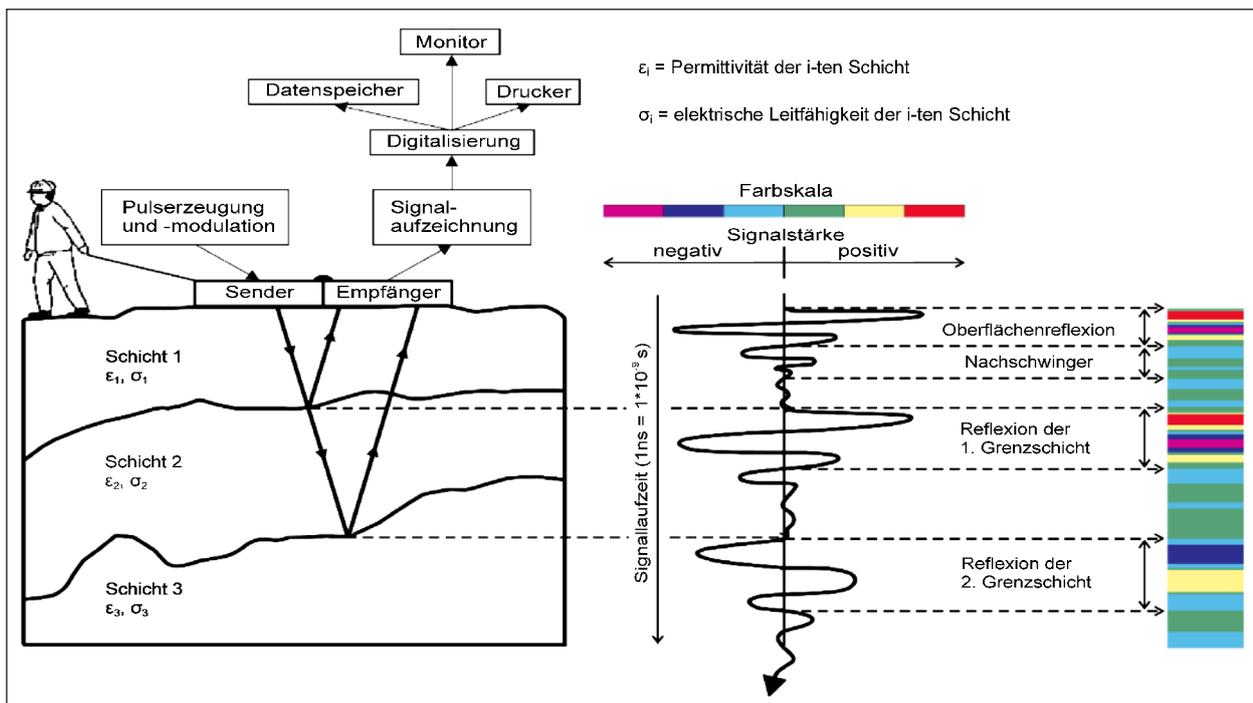


Bild 8: Bestandteile eines Georadarsystems und des dazugehörigen Datenoutputs [nach ALTEKÖSTER, 2004]

Parameter	Einheit	Definition und Wirkung
Antennentyp	-	<ul style="list-style-type: none"> Handgeführte Antennen mit Oberflächenkontakt (ground-coupled antennas) für kleinräumige Untersuchungsabschnitte an Ingenieurbauwerken oder zur Generierung von Querprofilen in 2D- oder 3D-Modellen (a) Fahrzeugmontierte Hornantennen (air-coupled antennas) für großräumige und netzbasierte Untersuchungsabschnitte (b) Array-Antennensysteme als Panelantennen aus mehreren Einzelantennen mit unterschiedlichen Phasenlängen [STRYK et al., 2015] (c) 
Antennenkonfiguration	-	<p>Impulsradar, welches einzelne Impulse aussendet und die Zeit zwischen Aussendung und Empfang zur Reichweiten- und Geschwindigkeitsbestimmung (time domain) nutzt.</p> <ul style="list-style-type: none"> Monostatisch: Transmitter und Receiver sind identisch Bistatisch: Transmitter und Receiver weisen einen bestimmten Offset zueinander auf <p>Dauerstrichradar (CW-Radar) als stepped-frequency (SF) Radar, welches die Phase des reflektierten Signals zur Reichweitenbestimmung und die Frequenzänderung (frequency domain) zur Ausbreitungsgeschwindigkeit nutzt [WEISS, 2009].</p>
Messfrequenz	MHz	Die Frequenz der elektromagnetischen Wellen kann nach aktuellem Stand der Technik bei Impuls-Systemen bis zu 4.000 MHz und bei SF Systemen bis zu 8.000 MHz betragen [PAJEWSKI et al., 2015]. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Frequenz f und Wellenlänge λ nach (3.9) gilt, dass hochfrequente Impulse eine kleinere Wellenlänge aufweisen und dadurch ein besseres Auflösungsvermögen gewähren. Im Umkehrschluss reduziert sich die Eindringtiefe.
Impulsrate	KHz	Maß für die Folgefrequenz der Impulse (Pulse Repetition Frequency (PRF)) als Maßgabe für die mögliche Anzahl an Scans pro Sekunde. Die Impulsrate beträgt nach Stand der Technik aktuell bis zu 800 KHz und ist abhängig von der Impulsdauer.
Scanrate	Scan/s Scan/ Einheit	Die Skalierung des Messweges durch die Anzahl an Scans je Zeitintervall, wobei die Größe der Scanrate maßgeblich von der möglichen bzw. notwendigen Messgeschwindigkeit abhängt. Je niedriger die Scanrate eingestellt ist, desto geringer ist auch die Datendichte in Messrichtung. Wird die Scanrate im Verhältnis zur Messgeschwindigkeit zu hoch eingestellt, entstehen vor dem Hintergrund der Wegaufnahme Diskrepanzen zwischen Scan und Messweg.
Samplerate	Sample/ Scan	Maß für die Anzahl an diskreten Datenpunkten (Samples) je Scan. Jedem Datenpunkt sind eine Amplitude und eine Signallaufzeit als Messdaten zugeordnet. Je größer die Anzahl an Samples je Scan ist, desto glatter ist der zeitliche Verlauf des Scans. Zur vollständigen Verarbeitung des Signals und Vermeidung von Aliasing-Effekten ist das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem zu berücksichtigen. So sollte die Samplerate mindestens der doppelten oberen Grenzfrequenz f_g des durch die Bandbreite B begrenzten Signals entsprechen [PLASSMANN und SCHULZ, 2016]
Time Range	ns	Angabe des Zeitbereichs, in welchem Messdaten zu einem Scan aufgenommen werden. Die Time Range kann bis zu 200 ns betragen [STRYK et al., 2015].
Messgeschwindigkeit	m/s km/h	Die Messgeschwindigkeit wird durch den Untersuchungsabschnitt definiert. Bei zu hoher Messgeschwindigkeit im Verhältnis zur Impuls- und Scanrate entstehen Messlücken.
Signalumwandlung	Bit	Jedes analog aufgezeichnete Signal wird im Zuge der Datenverarbeitung in ein diskretes Signal digitalisiert. Nach aktuellem Stand der Technik beträgt die Digitalisierungsrate 16 oder 32 Bit.
Filterfunktionen ¹	-	<p>Funktionen zur Signalaufbereitung und Rauschunterdrückung in vertikaler und horizontaler Richtung [Geophysical Survey Systems Inc., 2015d] in Form von IIR Filter (Infinite Impulse Response) oder FIR Filter (Finite Impulse Response):</p> <ul style="list-style-type: none"> „Vertical low pass“: Frequenzbegrenzung im hohen Bereich „Vertical high pass“: Frequenzbegrenzung im niedrigen Bereich „Stacking“: Unterdrückung von kurzen räumlich begrenzten zufälligen Signalen in horizontaler Richtung „Background Removal“: Unterdrückung von zeitkonstanten Signalen über mehrere oder alle Scans im Radargramm
Gain ¹	-	Funktion zur Kompensation von Verlusteffekten im Untersuchungsmedium und stärkeren Ausprägung der Amplituden.
Wegaufnahme	-	Messinstrument zur Verortung der Georadar-Daten. Die Wegaufnahme kann bei großräumigen Untersuchungsgebieten mittels „Global Navigation Satellite System“ (GNSS) oder Encoder erfolgen. Bei dem Einsatz eines Encoders ist das Einmessen vor Ort zur Festlegung eines Startpunktes, mit Ausnahme eines fliegenden Starts, notwendig. Bei kleinräumigen Untersuchungsabschnitten kann ein Messrad genutzt werden.

¹ Spezifische Funktionen der durch den Forschungsnehmer genutzten Radarsteuerung SIR20® des Herstellers Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI).

Tab. 2: Wesentliche Parameter des Messsystems

3.3.2 Untersuchungsmedium

Das Untersuchungsmedium beeinflusst eine Georadarmessung durch seine stoffliche Zusammensetzung und dem daraus resultierenden physikalischen Eigenschaftsprofil (Kapitel 3.2.1). Je inhomogener das Untersuchungsmedium ist, desto schwieriger gestaltet sich die Auswertung der Georadar-Daten, da eine Zunahme an Grenzflächen eine Zunahme an Reflexionen sowie Veränderung der elektromagnetischen Eigenschaften bedeutet. Die Interpretation der Messdaten wird dadurch erheblich erschwert.

Im vorliegenden Anwendungsfall ist Asphalt der maßgebende Verbundbaustoff der Straßenbefestigung. Dieser besteht aus einem Gesteinskörnungsgemisch, Bitumen als Bindemittel sowie etwaiger Zusätze und dem Hohl- bzw. Porenraum. Jede dieser Komponenten besitzt ein eigenes elektromagnetisches Eigenschaftsprofil sowie einen entsprechenden Volumenanteil in der Verbundkonstruktion. Durch die Vielzahl an Asphaltmischgutarten und -sorten, welche im technischen Regelwerk verankert sind, ist keine pauschale Abschätzung des Eigenschaftsprofils möglich. Vielmehr handelt es sich bei jeder Georadarmessung und jeder detektierten Schicht in der Straßensubstanz um eine Einzelfallbetrachtung. Im Bereich des ungebundenen Oberbaus werden die elektromagnetischen Eigenschaften von der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemischs sowie von der Art des verwendeten Gesteins beeinflusst. Dies gilt entsprechend für das im Asphalt verwendete Gesteinskörnungsgemisch.

Bei der Betrachtung des Untersuchungsmediums sind darüber hinaus die Einflüsse aus Feuchtigkeit und Chloriden zu berücksichtigen. Deren stark abweichendes dielektrisches und elektromagnetisches Eigenschaftsprofil führt zu erschwerten Bedingungen bei der Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit bei der Transformation der Signallaufzeit in die Tiefe von Reflektoren [REYNOLDS, 2011]. Der Einfluss resultiert aus der Veränderung der Materialzusammensetzung, da durch Niederschlagsereignisse der ursprünglich luftgefüllte Poren- und Hohlraum sowie die trockene Oberfläche vernässen. Dabei gilt es freies Porenwasser und Adsorptionswasser zu unterscheiden [ALTEKÖSTER, 2004]. Die Unterscheidung ist insofern sinnvoll, da sich die Gesamtpermittivität der Straßensubstanz als Verbundkonstruktion durch den Einfluss von freiem Porenwasser mit der relativen Permittivität von $\epsilon_r \approx 81,00$ erheblich erhöht. Bei

vorhandenem Adsorptionswasser fällt dieser Effekt geringer aus, da dessen relative Permittivität dem Bereich von Frost zuzuordnen ist, welcher eine relative Permittivität von $\epsilon_r \approx 4,00$ bis $6,00$ aufweist [ASTM International D18 Committee, 2011] und damit im Bereich des elektromagnetischen Eigenschaftsprofils von Asphalt ($\epsilon_r \approx 5,00$ bis $9,00$) liegt. Es ist allerdings unstrittig, dass sich die relative Gesamtpermittivität des Straßenoberbaus sowie die elektrische Leitfähigkeit durch den Einfluss von Wasser, gegenüber dem ursprünglich mit Luft gefüllten Porenraum ($\epsilon_r \approx 1,00$) [DGZfP Merkblatt B 10, 2008], erhöht [DE LOOR, 1983; ANNAN, 2003; FERNANDES et al., 2017]. In der Literatur wird die Zunahme der relativen Permittivität zwischen trockenem und feuchtem Asphalt näherungsweise mit dem Faktor 3 angegeben. Gleichermaßen erhöht sich die magnetische Permeabilität μ_r etwa um das Dreifache [DANIELS, 2007]. Dadurch nimmt ebenfalls der Brechungsindex n respektive die Richtungsänderung der elektromagnetischen Wellen zu und führt zu steileren Brechungswinkeln an den Grenzflächen (Kapitel 3.3.2). Darüber hinaus nimmt durch die erhöhte Ionenkonzentration und die damit verbundenen frei beweglichen Ladungsträger die elektrische Leitfähigkeit der Straßensubstanz zu [DANIELS, 2007]. Die mit der Vernässung der Straßensubstanz zu erwartende höhere relative Gesamtpermittivität führt gleichermaßen zu einer Reduzierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Impulse [ASTM International D18 Committee, 2011]. Darüber hinaus werden die elektromagnetischen Impulse durch die höhere elektrische Leitfähigkeit stärker gedämpft [MANACORDA et al., 2015] (Bild 9). Die dabei zu berücksichtigende Tiefenwirkung ist aufgrund der per Definition dichten Asphaltbefestigung und damit durch die Poren- und Hohlraumstruktur in der Straßensubstanz beschränkt. Daher ist davon auszugehen, dass in erster Linie das Eigenschaftsprofil der Asphaltdeckschicht durch Regenereignisse bzw. aufgebrauchte Auftaumittel beeinflusst wird.

Die Straßensubstanz besteht im Allgemeinen aus einem Schichtenprofil, wobei eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen dem gebundenen und ungebundenen Oberbau getroffen wird. Die Dicke beider Oberbauten sowie die Gesamtdicke des Konstruktionsaufbaus hängen von der Straßenkategorie ab und sind bei der Auswahl der Messfrequenz sowie der Time Range der Scans zu berücksichtigen. Unter Annahme eines frostempfindlichen Bodens beträgt die Gesamtdicke des frostsicheren

Oberbaus, welches in der Regel dem Konstruktionsaufbau entspricht, gemäß den RStO 35,0 cm (Bk0,3) bis 85,0 cm (\geq Bk10).

Im vorliegenden Anwendungsfall wird ausschließlich der Bereich der Asphaltbefestigungen berücksichtigt. Demnach beträgt die Gesamtdicke des gebundenen Oberbaus mit Ausnahme des Einbaus einer Asphalttragdeckschicht minimal 14,0 cm im Bereich der Belastungsklasse Bk0,3 und maximal 34,0 cm im Bereich der Belastungsklasse Bk100. Dabei handelt es sich allerdings um idealisierte Bauweisen, welche vor allem im Bereich von Neubaustrecken vorzufinden sind. Im gewachsenen Bestand ist vorrangig davon auszugehen, dass kein Oberbau im Sinne des technischen Regelwerkes vorhanden ist, sondern vielmehr komplexere

Schichtenprofile mit mehreren Zwischenschichten zu erwarten sind.

Neben der Abschätzung der Detektionstiefe ist die Fragestellung und Zielsetzung der Georadarmessung von besonderer Bedeutung. So ist eine zweckmäßige Auswahl der messtechnischen Größen zu treffen, um ein entsprechendes Auflösungsvermögen zu gewährleisten und das Untersuchungsziel zu erreichen. GOLKOWSKI (2003) hat dazu eine Auswahl an Untersuchungszielen mit der entsprechend zweckmäßigen Messfrequenz dargelegt (Tabelle 3).

Tabelle 4 gibt einen zusätzlichen Überblick über die wesentlichen Parameter zum Untersuchungsmedium.

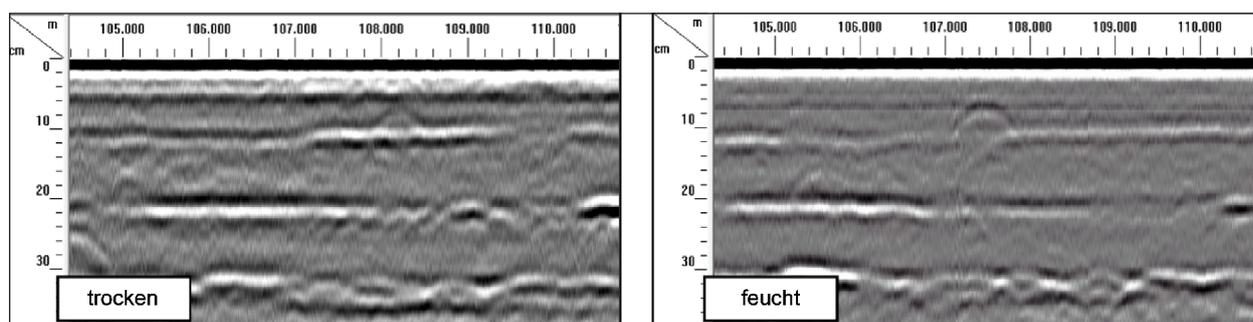


Bild 9: Radargrammvergleich zwischen einer trockenen und einer feuchten Straßensubstanz

Untersuchungsziel	Empfohlene Messfrequenz
Untersuchung des Unterbaus/Untergrundes	400 – 900 MHz
Schichtdickenbestimmung im Oberbau nach dem Raster der RStO Eindringtiefe von 50 cm muss sichergestellt sein	\geq 1,0 GHz
Schichtdickenbestimmung im gebundenen Oberbau	1,0 – 1,5 GHz
Detaillierte Analysen der Struktur im gebundenen Oberbau	1,5 – 2,0 GHz

Tab. 3: Untersuchungsziele einer Georadarmessung mit empfohlener Messfrequenz [GOLKOWSKI, 2003]

Parameter	Einheit	Definition und Wirkung
Stoffliche Zusammensetzung	-	Die Straßensubstanz besteht aus einem mehrschichtigen Profil und wird grundsätzlich in den gebundenen und ungebundenen Oberbau unterteilt. Jede dieser Schichten weist eine andere stoffliche Zusammensetzung auf, wodurch das elektromagnetische Eigenschaftsprofil variiert. Im Einzelnen beeinflusst der vorhandene Poren- und Hohlraumgehalt, gegebenenfalls vorhandene Feuchtigkeit oder ungebundenes Wasser sowie Auftaumittel das Eigenschaftsprofil.
Feuchtegehalt	%	Feuchtigkeit kann als Oberflächenfeuchte (Adsorptionswasser) oder als ungebundenes Wasser im Poren- oder Hohlraum auftreten. Der Feuchtegehalt ist das Verhältnis der Masse des im Stoff enthaltenen Wassers zur Masse des wasserfreien Stoffes. Je höher der Feuchtegehalt ist, desto größer sind mögliche Dämpfungseffekte in der Straßensubstanz. Ferner verlängert sich die Signallaufzeit der elektromagnetischen Impulse.
Hohlraumgehalt	%	Der Hohlraumgehalt stellt das Verhältnis von Hohlraum- und Porenvolumen zum Gesamtvolumen eines Stoffes oder Stoffgemisches dar und übt aufgrund der sehr geringen relativen Permittivität einen großen Einfluss auf das dielektrische und elektromagnetische Eigenschaftsprofil aus.
Chloride	%	Chloride werden als Auftaumittel auf die Straße aufgebracht und führen im Bereich der Straßenoberfläche zu einer erheblichen Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit und damit zu Dämpfungs- und Streueffekten. Da es sich in der Regel um in Wasser gelöste Chloride handelt, tritt dieser Fall zumeist in Verbindung mit einem erhöhten Feuchtegehalt auf.
Relative Permittivität ϵ_r	-	Die relative Permittivität beschreibt die temperatur- und frequenzabhängigen feldschwächenden Effekte durch die dielektrische Polarisierung der Ladungsträger in einem elektrisch nicht- bzw. schwach-leitenden Medium, welches einem äußeren elektrischen Feld ausgesetzt ist [DANIELS, 2007; HOFMANN et al., 2007]. Je größer die relative Permittivität ist, desto größer sind diese Effekte. Es gilt der Zusammenhang nach (3.1). Eine Auswahl an Tabellenwerten findet sich zum Beispiel in [FGSV Arbeitspapier Nr. 443A, 2016].
Detektionstiefe	cm	Die mögliche Detektionstiefe der elektromagnetischen Impulse hängt von den elektromagnetischen Eigenschaften des Untersuchungsmediums ab. Es kommt bei der Durchstrahlung zu Dämpfungs- und Streueffekten, welche die Impulse abschwächen. Ferner werden Anteile der Impulse an Grenzflächen reflektiert. Darüber hinaus sind die Leistungsfähigkeit und die Abstrahlcharakteristik des eingesetzten Messsystems von Bedeutung.

Tab. 4: Parameter des Untersuchungsmediums

3.3.3 Umgebungsfaktoren

Als Umgebungsfaktoren lassen sich alle Größen definieren, welche Auswirkungen von außen auf die Georadarmessung ausüben und nur bedingt durch die Anpassung von messtechnischen Größen zu kompensieren sind. In Verbindung mit der Fragestellung und Zielsetzung der Messung zählt hierzu auch der zu untersuchende Straßenraum, da die damit einhergehende Straßenkategorie und Verbindungsfunktion in der Regel auch die zulässige und mögliche Messgeschwindigkeit definiert. Im Bundesfernstraßennetz sind in diesem Zusammenhang grundsätzlich höhere Fahrgeschwindigkeiten notwendig und einzuhalten. Im nachgeordneten Netz sind auf Land- und Bundesstraßen in der Regel Höchstgeschwindigkeiten von maximal 100,0 km/h zulässig, sodass auf diesen Strecken bei entsprechend geringeren Geschwindigkeiten gemessen werden kann. Dabei sollte in jedem Fall der Grundsatz der Vermeidung einer Behinderung des fließenden Verkehrs gelten.

Als weiterer Außeneinfluss sind die Witterungsbedingungen zu benennen, welche zum Beispiel in

Form der Luft- oder Oberflächentemperatur Einfluss auf das Untersuchungsmedium und das damit verbundene elektromagnetische Eigenschaftsprofil haben [FGSV Arbeitspapier Nr. 443A, 2016]. Darüber hinaus ist der Feuchtegehalt des Untersuchungsmediums zu beachten, welcher direkt von der Temperatur abhängt und maßgeblich durch Niederschläge oder Frost generiert wird.

Neben den Witterungsbedingungen können oberflächennahe elektromagnetische Störquellen und Abstrahleffekte aus der Umgebung, zum Beispiel an metallischen Oberflächen von vorbeifahrendem Straßenverkehr, zu Wellenüberlagerungen und Hintergrundsignalen führen, welche die Datenauswertung und Dateninterpretation erschweren können. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über mögliche Außeneinflüsse, welche die Georadarmessung beeinträchtigen können. Das Arbeitspapier Nr. 443A der FGSV führt diese Übersicht weiter aus und empfiehlt entsprechende Kompensationsmaßnahmen.

Parameter	Einheit	Definition und Wirkung
Umgebungs-temperatur	K	Veränderung des elektromagnetischen Eigenschaftsprofils des Untersuchungsmediums.
Witterungs-bedingungen	-	Die Feuchtigkeit in dem Untersuchungsmedium, z. B. auf der Fahrbahnoberfläche oder in stark wasserhaltigen Böden kann die Eindringtiefe und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Impulse erheblich begrenzen. Es kommt zu Verlängerungen in der Signallaufzeit und zu verstärkten Dämpfungseffekten in der Straßensubstanz.
Elektro-magnetische Störquellen	-	Mobiltelefone, Funkanlagen und nicht entstörte Technik können lokale Signalveränderungen hervorrufen.
Straßen- und Netzkategorie	-	Die Straßenkategorie und Verbindungsfunktion definieren die Belastungskategorie und damit die Dimensionierung und den Aufbau der Straßensubstanz. Dadurch variieren die eingebauten Materialien sowie die Ausprägung von lokalen Substanzmerkmalen, wie Inhomogenität aus Einbauteilen oder Leitungen sowie mögliche Aufbauwechsel.

Tab. 5: Parameter der Außeneinflüsse

3.4 Messtechnik des Versuchsprogramms

3.4.1 Gerätekonfiguration

Die Versuchsprogramme der Objekt- (Kapitel 4.3) und Netzebene (Kapitel 6) wurden mit den Radarsteuerungen SIR 20® und SIR 30® (Subsurface Interface Radar) des Herstellers GSSI durchgeführt. In beiden Fällen handelte es sich um ein Impulsradar mit zwei Kanälen und einer bistatischen Antennenanordnung, wobei die Georadarmessungen jeweils mit zwei Hornantennen mit den Messfrequenzen 1.000 und 2.000 MHz durchgeführt wurden. Die Hornantennen wurden mit einem Montageabstand von 1,10 m am Heck des Messfahrzeugs in einer Parallelanordnung montiert. Der Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne betrug 0,40 m. Beim Einsatz der SIR 20® wurden die Antennenmodelle 4105 ($f = 2.000$ MHz) und 4108 ($f = 1.000$ MHz) und beim Einsatz der SIR 30® die Antennenmodelle 42000S ($f = 2.000$ MHz) und 41000S ($f = 1.000$ MHz) genutzt. Alle weiteren Spezifikationen zu den Messsystemen sind den Handbüchern des Herstellers zu entnehmen [Geophysical Survey Systems Inc., 2015c; Geophysical Survey Systems Inc., 2015d]. Die Hornantenne mit der Messfrequenz von $f = 2.000$ MHz war grundsätzlich rechts angeordnet. Als zusätzliche Messinstrumente wurden auf der Objektebene ein Encoder an der Fahrzeughinterachse zur Positionsmessung und ein Randabstandsmesser zur Einhaltung der Randabstände sowie Reduzierung der Schwankungen des Fahrweges genutzt (Bild 10) (Kapitel 4.3.1). Darüber hinaus wurde die Straßenoberfläche mittels Videokamera durch die Fahrzeugfrontseite aufgenommen.

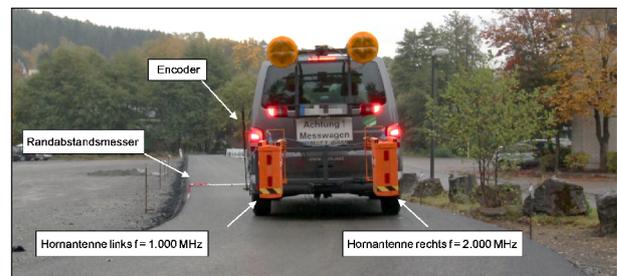


Bild 10: Konfiguration der Messtechnik auf der Objektebene

Auf der Netzebene wurde kein Randabstandsmesser eingesetzt, da sämtliche Untersuchungsstrecken einmalig befahren wurden. Ergänzend zum Encoder wurde zur Verortung der Messdaten ein GNSS in Form eines GPS genutzt.

Durch die parallele Aufnahme der Straßenoberfläche mittels Videoaufzeichnung konnten die gewonnenen Georadar-Daten in der Auswertung mit den Bildern der Straßenoberfläche verschnitten werden. Dies lieferte zusätzliche Anhaltspunkte über Art und Ausprägung zu gegebenenfalls vorhandenen Substanzmerkmalen oder Substanzschädigungen, sofern diese ebenfalls die Straßenoberfläche betreffen. Dabei galt es die Fahrzeuglänge als Versatz zwischen den Datensätzen zu berücksichtigen und bei der Datenverschnidung zu korrigieren.

3.4.2 Processing

Das Processing umfasste sämtliche softwaretechnischen Arbeitsschritte in der Datenerfassung, Datenverarbeitung und Datenausgabe, welche, mit Ausnahme der visuellen Vorauswertung der Radarprogramme zur Festlegung von Bohrkernentnahme-

stellen, keinen straßenbautechnisch interpretativen Charakter hatten. Die Datenverarbeitung wurde aus Kompatibilitätsgründen mit der Software „Radar Data Analyzer“ (RADAN®) Version 7.4 für Windows Betriebssysteme des Herstellers GSSI durchgeführt. Die weitergehende Auswertung und Interpretation der Messdaten im Rahmen des Post-Processings (Kapitel 3.4.2) erfolgte aufgrund des Datenausgabeformates „Comma-separated Values“ (CSV) in textverarbeitenden und tabellenkalkulatorischen Programmen.

Mit der Radarsteuerung SIR 20® wurden das Versuchsprogramm der Objektebene sowie die Georadar-Messungen auf den Untersuchungsstrecken der Netzebene in Sachsen-Anhalt und den Bundesstraßen B236 und B54 in Nordrhein-Westfalen durchgeführt (Kapitel 6.2). Die dabei genutzten

Messeinstellungen sind der Tabelle 6 zu entnehmen.

Zur Aufrechterhaltung des aktuellen Stands der Technik wurde während des Versuchsprogramms der Netzebene die Messtechnik umgestellt. Dies beinhaltete konkret die Umstellung der eingesetzten Radarsteuerung von SIR 20® auf SIR 30® sowie der dazugehörigen Antennen. Die Umstellung in der Signalverarbeitung führte zu Veränderungen in den Messeinstellungen (Tabelle 7). Darüber hinaus findet in der Datenausgabe eine Entkoppelung der Rohdaten und des Processings statt (DZT- und DZX-Files). Auf diese Weise können die zum Zeitpunkt der Messung eingestellten Schritte des Signal-Processings durch ein erneutes Einlesen der Rohdaten rückgängig gemacht werden, ohne die Georadarmessung wiederholen zu müssen.

Messeinstellung	Quantifizierung/Wert
Horizontale Einstellungen	
Messgeschwindigkeit Objektebene	Schrittgeschwindigkeit $\approx 7,0$ km/h
Messgeschwindigkeit Netzebene	Je nach Verkehrslage zwischen 50,0 und 80,0 km/h auf Bundesstraßen und 80,0 km/h auf Bundesautobahnen
Scanrate Objektebene	10, 20, 50 und 100 Scans/m 234 Scans/s
Scanrate Netzebene	10 Scans/m auf Bundesautobahnen 15 Scans/m auf Bundesstraßen 234 Scans/s
Impulsrate	300 KHz
Impulsdauer	0,5 ns ($f = 2.000$ MHz) 1,0 ns ($f = 1.000$ MHz)
Vertikale Einstellungen	
Samplerate	512 Samples/Scan
Signalumwandlung	16 bit
Relative Permittivität ϵ_r (Eingangswert als Darstellungsparameter zum Zeitpunkt der Messung)	6,25
Channel Informationen	
Kanäle	2
Time Range	12 ns ($f = 2.000$ MHz) 20 ns ($f = 1.000$ MHz)
Signal-Processing	
Gain	Manuell Number of Points = 1 11,90 dB
FIR Filter Objektebene	BOXCAR Vertical high Pass = 250 MHz BOXCAR Vertical low Pass = 5.495 MHz
FIR Filter Netzebene	Custom Filter
Datenausgabeformat	RADAN-File (*.DZT)

Tab. 6: Messeinstellungen der Radarsteuerung SIR 20®

Die Vorgehensweise des Processings, welches für den vorliegenden Anwendungsfall entwickelt wurde, ist in der Anlage A in Form von Ablaufplänen dargestellt. Diese gelten sowohl für das Versuchsprogramm der Objekt- als auch der Netzebene und greifen sämtliche wesentliche Arbeitsschritte in chronologischer Abfolge auf. Die Ablaufpläne unterliegen dabei einer grundsätzlichen Drittelung, ausgehend von der Datenerfassung, über die Datenverarbeitung bis zur Dateninterpretation, welche die Verknüpfung zum Post-Processing (Kapitel 3.4.2) darstellt. Die Abläufe sind nicht quantifiziert, sondern nur grundlegend im Ablauf angeordnet, sodass eine Übertragbarkeit auf weitere Georadarmessungen prinzipiell möglich ist. Die Vorgehensweise orientiert sich in diesem Zusammenhang an den herstellereigenen Parametern der Messtechnik sowie der durch den Forschungsnehmer genutzten Softwarelösung und kann durch die Anwendung alternativer Systeme variieren.

Im Zuge der Datenvorbereitung wurden die drei folgenden Arbeiten durchgeführt:

1. Die Georadar-Daten umfassen zumeist längere Strecken als für die eigentliche Untersuchung vorgesehen und notwendig sind. Hintergrund ist beispielsweise ein fliegender Start bei Messungen auf Bundesfernstraßen, wo ein Einmessen vor Ort durch den fließenden Verkehr verhindert wird. Die Georadar-Daten bzw. die entsprechenden Radargramme sind daher auf die Ziellänge zuzuschneiden. Dies kann anhand der Angabe der jeweiligen Scannummern (Start- und Endwert) erfolgen, wobei die definierte Scanrate in Scans/m beachtet werden muss. Auf der Objektebene wurden im Baukonzept (Kapitel 4.2.1) Stabstähle in die Frostschutzschicht integriert, um durch das abweichende Reflexionsverhalten an der metallischen Oberfläche, fixe Start- und

Messeinstellung	Quantifizierung/Wert
Horizontale Einstellungen	
Messgeschwindigkeit	Je nach Verkehrslage zwischen 50,0 und 80,0 km/h auf Bundesstraßen und 80,0 km/h auf Bundesautobahnen Ausnahme: B10 in Rheinland-Pfalz mit 30,0 km/h
Scanrate	20 Scans/m Ausnahme: B10 in Rheinland-Pfalz durch die geringe Messgeschwindigkeit mit 25 Scans/m 655 Scans/s
Impulsrate	450 KHz
Impulsdauer	0,5 ns (f = 2.000 MHz) 1,0 ns (f = 1.000 MHz)
Vertikale Einstellungen	
Samplerate	512 Samples/Scan
Signalumwandlung	32 bit
Relative Permittivität ϵ_r (Eingangswert als Darstellungsparameter zum Zeitpunkt der Messung)	6,25
Channel Informationen	
Kanäle	2
Time Range	12 bis 15 ns (f = 2.000 MHz) (in Abhängigkeit von der Mächtigkeit des gebundenen Oberbaus) 20 ns (f = 1.000 MHz)
Signal-Processing	
Gain	Automatic Number of Points = 1 13,00 bis 16,00 dB
FIR Filter	Custom Filter
Datenausgabeformat	RADAN-File (*.DZT) Informations-File zu Processing-Schritten (*.DZX)

Tab. 7: Messeinstellungen der Radarsteuerung SIR 30®

Endpunkte in den Radargrammen der Georadarmessungen zu generieren (Bild 20).

2. Untersuchungsstrecken, welche in zwei Fahrrichtungen aufgenommen werden, sind einseitig zu drehen, um eine querschnittsgetreue und parallele Auswertung beider Fahrrichtungen vornehmen zu können. Dies ist vor allem im Hinblick auf die Aufnahme von Querprofilen und die stationsgetreue Entnahme von Bohrkernen im Querschnitt sinnvoll. Bei Untersuchungen im Bundesfernstraßennetz kann dieser Schritt bei baulich getrennten Fahrbahnen entfallen, sofern die Fahrbahnen getrennt zu betrachten sind. Auf der Objektebene war in diesem Zusammenhang die Messlinie 3 zu drehen, da diese entgegen der Stationierungsrichtung aufgenommen wurde.
3. Die Parallelmessung mit mehreren Antennen und gegebenenfalls mehreren Messfrequenzen führt zu einer Verknüpfung der Rohdaten im Datenausgabeformat. Im Zuge der antennen- und frequenzspezifischen Kalibrierung der Messdaten sind diese Rohdaten zu splitten.

Die Kalibrierung der Messdaten dient darüber hinaus zur Einführung eines Bezugshorizontes, welches im Bereich des Straßenwesens typischerweise die Straßenoberfläche ist. Dabei wird mittels Metallplatte unterhalb jeder Antenne ein stationärer Kalibrierscan durchgeführt (Bild 11).

Durch sogenanntes Bumping am Messfahrzeug während des stationären Scans werden auftretende Unebenheiten an der Straßenoberfläche während der eigentlichen Messung simuliert. Darüber hinaus dient die Metallplatte zur Bestimmung der maßgebenden Amplitude bei einer perfekten Reflexion des



Bild 11: Erzeugung von stationären Kalibrierscans auf der Versuchsstrecke mittels Metallplatte

einfallenden Signals des elektromagnetischen Impulses. Diese Amplitude ist im Vergleich zu der Straßenoberfläche größer, da keine Transmission an der Grenzfläche stattfindet. Neben der perfekten Reflexion an der Metallplatte umfasst das an der Empfangsantenne ankommende Signal sämtliche statischen Reflexionen weiterer metallischer Oberflächen, wie zum Beispiel vom Messfahrzeug.

Die gemessene Amplitude ist eine Eingangsgröße bei der Berechnung der relativen Permittivität ϵ_r einzelner Schichten ohne eine Beprobung durchzuführen und die Tiefe der Grenzflächen zu kennen. Dies erfolgt auf Basis von Amplitudenverhältnissen sowie der Verteilung der reflektierenden und transmittierenden Anteile des elektromagnetischen Impulses an den Grenzflächen. Im vorliegenden Anwendungsfall kam dieser Auswertungsansatz bei der Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. der relativen Permittivität in den verschiedenen Asphaltsschichten des gebundenen Oberbaus nach (3.21) bis (3.23) durch die Nutzung der Reflexionskoeffizienten zum Tragen.

Aus dem stationären Kalibrierscan wurde im Anschluss ein Horn calibration File (CZT-File) generiert, welches mit den eigentlichen Georadar-Daten verschnitten wurde. Dadurch wurden die Straßenoberfläche als Bezugshorizont im Radargramm eingeführt und die zusätzlichen stationären Reflexionen aus den Messdaten herausgefiltert (Bild 12).

Im zeitlichen Verlauf des Scans wurde die Straßenoberfläche näherungsweise nach 130 Samples erreicht. Diese wurde in diesem Zusammenhang als erste größte positive Amplitude (Peak) definiert, da die Straßenoberfläche die Grenzfläche mit dem größten dielektrischen Kontrast durch den Übergang von Luft zu Asphalt darstellte (Bild 13). Dieser Peak wurde in diesem Zusammenhang als Time Zero definiert.

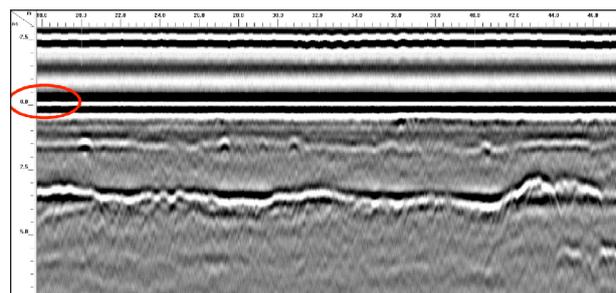


Bild 12: Straßenoberfläche als Bezugshorizont (Station 0 in vertikaler Richtung) im Radargramm

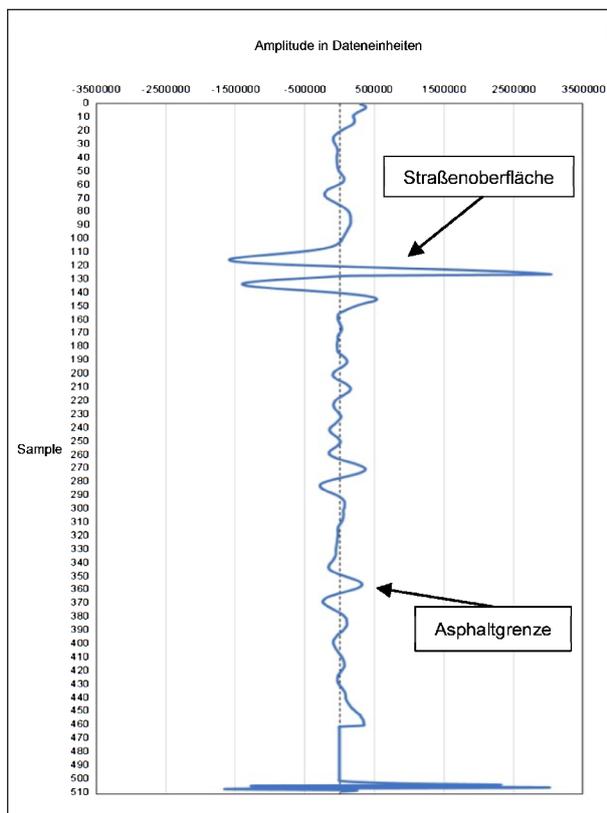


Bild 13: Wellenmuster im O-Scope (Wiggle) der oberen (Straßenoberfläche) und unteren Grenzfläche (Asphaltgrenze und Planum) des Asphaltoberbaus auf der Versuchsstrecke

Die Amplituden des O-Scopes werden in der Regel in Data Units angegeben. Die Umrechnung in die gängigere Einheit Dezibel kann nach (3.20) erfolgen [Geophysical Survey Systems Inc., 2015b].

$$A_{dB} = 20 \times \log_{10}(A_{\text{Data Units}}) \quad (3.20)$$

Mit

A_{dB} : Amplitude in dB

$A_{\text{Data Units}}$: Amplitude in Data Units

Grenzflächen, welche in Messrichtung verlaufen, stellen in der Regel eine Schichtgrenze in der Straßensubstanz dar. Die Schichtgrenzen sind dabei zumeist durch die Abfolge von drei gegensätzlich polarisierten Halbwellen charakterisiert und werden im Rahmen der Datenverarbeitung als Layer definiert und anschließend durch das Setzen von Picks interpretiert. Im vorliegenden Anwendungsfall liegt der Layerdefinition folgende Farbcodierung zugrunde:

- Asphaltdeckschicht (Gelb)
- Asphaltbinderschicht (Blau)

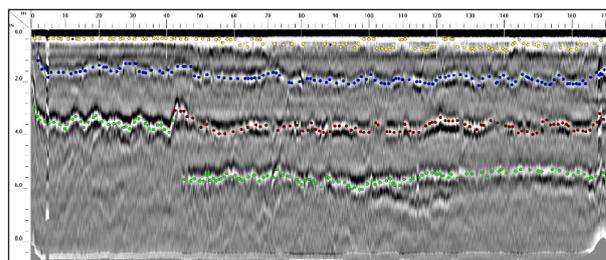


Bild 14: Radargramm im Graustufenformat der Messlinie 1 der Objektebene mit Single-Picks zur Definition der Grenzflächen und Interpretation der Layer (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz)

- Obere Lage der Asphalttragschicht (ausschließlich im Bereich der Belastungsklasse Bk100) (Rot)
- Untere Lage der Asphalttragschicht beziehungsweise Asphaltgrenze mit einem vertikalen Versatz im Bereich des Aufbauwechsels auf der Objektebene an Station 0+045 (Grün)

Die Interpretation der Schichtgrenzen erfolgte durch ein Single-Pick Tool, wobei Einzelpunkte in einzelnen Scans unter Berücksichtigung definierter Pickparameter gesetzt wurden (Bild 14). Optional lassen sich deren Zwischenräume über eine Blockselektion ebenfalls mit Picks auffüllen, wodurch eine höhere Datenmenge für das Post-Processing generiert wird.

Die Pick-Parameter wurden folgendermaßen festgelegt:

- Die positiven Amplituden wurden als maßgebende Polarisationsgröße für die Verortung der Picks im zeitlichen Verlauf der Scans gewählt. Die Grenzflächen wiesen bei ausreichendem dielektrischem Kontrast zumeist ein entsprechendes Amplitudenmaximum in der positiven Halbwelle auf. Dieses wurde allgemein als vertikaler Bezugspunkt hinsichtlich des Verlaufs der Schichtgrenze definiert. War der dielektrische Kontrast geringer ausgeprägt, sodass eine Reflexion nur näherungsweise durch die Abschätzung einer ähnlichen Signallaufzeit anzunehmen oder eine Phasenumkehr zu erkennen war, wurde die maßgebende Polarisation auf das absolute oder gegebenenfalls das negative Amplitudenmaximum umgestellt.
- Die Suchfunktion zur Verortung eines Picks in vertikaler Richtung wurde derart definiert, sodass der Pick innerhalb eines Scans unter Berücksichtigung der gewählten maßgebenden

Polarisation automatisch in den nächstgelegenen Peak gesetzt wird. Der Abstand zu dem durch das auswertende Personal ursprünglich im Radargramm gesetzte Pick (Cursorposition) wurde dadurch minimiert.

- Die Suchfunktion zur Verortung eines Picks in horizontaler Richtung wurde mit der Suchweite 5 bis 9 definiert, welches der Anzahl an Scans entspricht, welche einem entsprechenden Peak abgesehen werden. Die Suchweite wurde dabei auf Basis der Ausprägung der Amplitude in den Grenzflächen festgelegt.
- Zur Vorbereitung des Post-Processings (Kapitel 3.4.2) wurden die Georadar-Daten in Form einer CSV-Datenstruktur exportiert. Die Datensätze unterlagen dabei einem konstanten Stationierungsraster (distance Intervall). Da die im Radargramm verorteten Picks in den Grenzflächen in der Regel nicht diesem Raster entsprechen, werden die im Radargramm gesetzten Picks im Export durch gemittelte Zwischenpunkte in dem Stationierungsraster ersetzt.

Jedem definierten Layer wurde eine relative Permittivität als maßgebende Größe zur Ermittlung der Tiefe zugeordnet. Als Ausgangswert wurde diese mit 6,25 festgelegt. Diese Eingangsgröße galt ebenfalls für alle weiteren definierten Layer des ungebundenen Oberbaus. Dieser Wert basiert auf dem Erfahrungshintergrund des auswertenden Personals des Forschungsnehmers und beinhaltet keinen allgemeingültigen Charakter. Sofern der Untersuchungsabschnitt der Georadmessung aufgrund der Fragestellung und Zielsetzung keiner Beprobung unterzogen wird, kann dieser Eingangswert ebenfalls als Grundlage für die weitere Datenauswertung und Datenbewertung genutzt werden. Es handelt sich dann um unkalibrierte Georadar-Daten, deren Genauigkeit in der Wiedergabe des tatsächlichen Konstruktionsaufbaus als eingeschränkt bewertet werden muss.

Die relative Permittivität ist durch eine Beprobung des Untersuchungsabschnitts im Rahmen des Processings nachträglich derartig anzupassen, dass das Radargramm den tatsächlichen Konstruktionsaufbau möglichst genau wiedergibt. Dabei ist die Angabe der wahren Lage und Tiefe von Schichtgrenzen und Substanzmerkmalen das wesentliche Auswertziel. Die Anpassung erfolgt in der Regel durch die Entnahme von Bohrkernen, um die tatsächliche Tiefe von Schichtgrenzen in situ zu be-

stimmen (Kapitel 9.6.2). Sofern der ungebundene Oberbau ebenfalls Gegenstand der Georadmessung ist, ist die Beprobung durch entsprechende Untersuchungen, wie zum Beispiel Rammkernbohrungen oder Schürfe, zu ergänzen. Durch die dadurch bekannten Tiefen der Grenzflächen können, unter Verwendung des vereinfachten Berechnungsansatzes nach (3.8) und (3.17), die relative Permittivität ϵ_r der einzelnen Schichten sowie die Ausbreitungsgeschwindigkeit v der elektromagnetischen Impulse berechnet werden.

In der Regel deckt innerhalb der Beprobung eine Entnahmestelle einen definierten und als homogen erachteten Teilabschnitt des Untersuchungsabschnitts ab. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde die Festlegung von homogenen Abschnitten im Rahmen der visuellen Vorauswertung getroffen. Die elektromagnetischen Eigenschaften des auf diese Weise ausgewiesenen homogenen Abschnittes wurden anhand der an der Entnahmestelle berechneten Ausbreitungsgeschwindigkeit jeder Schicht an die tatsächlichen Verhältnisse in der Straßensubstanz angepasst. Dabei wurde jede vorhandene Schicht separat betrachtet und korrigiert. Die zur Definition von Homogenität entwickelten Kriterien sind in Kapitel 8.3.1 beschrieben und die Vorgehensweise der Beprobung der Objektebene in Kapitel 4.3.5 sowie der Netzebene in Kapitel 6.3.

Alternativ zur Ermittlung der relativen Permittivität respektive der Ausbreitungsgeschwindigkeit v mittels eines definierten Eingangswertes, kann die Berechnung durch Reflexionskoeffizienten nach (3.12) erfolgen [STRYK et al., 2015]. Dabei werden die Amplitudenverhältnisse zwischen dem Kalibrier-scan und den Scans der Straßensubstanz zur Berechnung der Reflexionskoeffizienten der vorhandenen Grenzflächen herangezogen, wobei die Verwendung von Hornantennen mit einem entsprechenden Abstand zur Straßenoberfläche vorauszusetzen ist [Geophysical Survey Systems Inc., 2015a]. Unter Einbeziehung der Signalgeometrie aus Antennenhöhe, Abstrahlcharakteristik, Einfallswinkel der elektromagnetischen Impulse sowie der Signallaufzeiten lassen sich anschließend die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den jeweiligen Schichten ermitteln.

Alternativ können die relativen Permittivitäten der Asphalt-schichten aus den Amplitudenverhältnissen ermittelt und anschließend die Ausbreitungsgeschwindigkeiten nach (3.8) berechnet werden [AL-QADI et al., 2005]. Für die Berechnung der relativen

Permittivität der Asphaltdeckschicht gilt der rechnerische Zusammenhang nach (3.21).

$$\epsilon_{r,1} = \left[\frac{1 + \frac{A_0}{A_m}}{1 - \frac{A_0}{A_m}} \right]^2 \quad (3.21)$$

Mit

A_i : Amplitude der Oberflächenreflexion der Straßensubstanz in Data Units

A_m : Amplitude des stationären Kalibrierscans über einer Metallplatte in Data Units

Für die relative Permittivität der Asphaltbinder-schicht gilt der Zusammenhang nach (3.22).

$$\epsilon_{r,2} = \epsilon_{r,1} \times \left[\frac{1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 + \frac{A_1}{A_m}}{1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 - \frac{A_1}{A_m}} \right]^2 \quad (3.22)$$

Mit

A_2 : Amplitude der Grenzflächenreflexion zwischen der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht der Straßensubstanz in Data Units

Für alle weiteren Schichten der Straßensubstanz ($n \geq 3$) gilt der rechnerische Zusammenhang nach (3.23).

$$\epsilon_{r,n} = \epsilon_{r,n-1} \times \left[\frac{1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 + \sum_{i=1}^{n-2} RI \times \frac{A_i}{A_m} + \frac{A_{n-1}}{A_m}}{1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 - \sum_{i=1}^{n-2} RI \times \frac{A_i}{A_m} - \frac{A_{n-1}}{A_m}} \right]^2 \quad (3.23)$$

Mit

RI: Reflexionskoeffizient der i-ten Schichtgrenze nach (3.12) (dimensionslos)

Grenzflächen, welche quer zur Messrichtung des Georadars verlaufen, werden im Radargramm in Form von Diffraktionshyperbeln dargestellt, sofern deren Ausprägung und Geometrie näherungsweise der Wellenlänge der elektromagnetischen Impulse entspricht oder entsprechend kleiner ist [KILIAN und WEBER, 2003]. Diese sind charakteristisch für lokale Objekte oder Substanzmerkmale sowie Substanzschädigungen (Bild 15).

Hintergrund der Hyperbelfunktion ist die Richtwirkung der elektromagnetischen Impulse und die räumliche Ausbreitung im Untersuchungsmedium [REYNOLDS, 2011], sodass bereits Objekte mit größerem horizontalem Abstand zur Sende- und Empfangsantenne detektiert werden. Dadurch, dass Reflexionen von Grenzflächen im Radargramm ausschließlich lotrecht aufgetragen werden, werden diese Reflexionen, bezogen auf die Antennenposition, in einer größeren Tiefe im Radargramm visualisiert. Dies resultiert aus einer verlängerten Signallaufzeit. Diese Reflexionen geben damit allerdings nicht die wahre Tiefe des Substanzmerkmals oder des Objektes wieder. Die wahre Tiefe wird durch diejenige Reflexion bestimmt, die bei lotrechter Position der Sende- und Empfangsantenne über dem entsprechenden Objekt erzeugt wird. Dies entspricht dem Scheitelpunkt der Diffraktionshyperbel im Radargramm, welcher die geringste Signallaufzeit aufweist. Zur besseren Darstellung

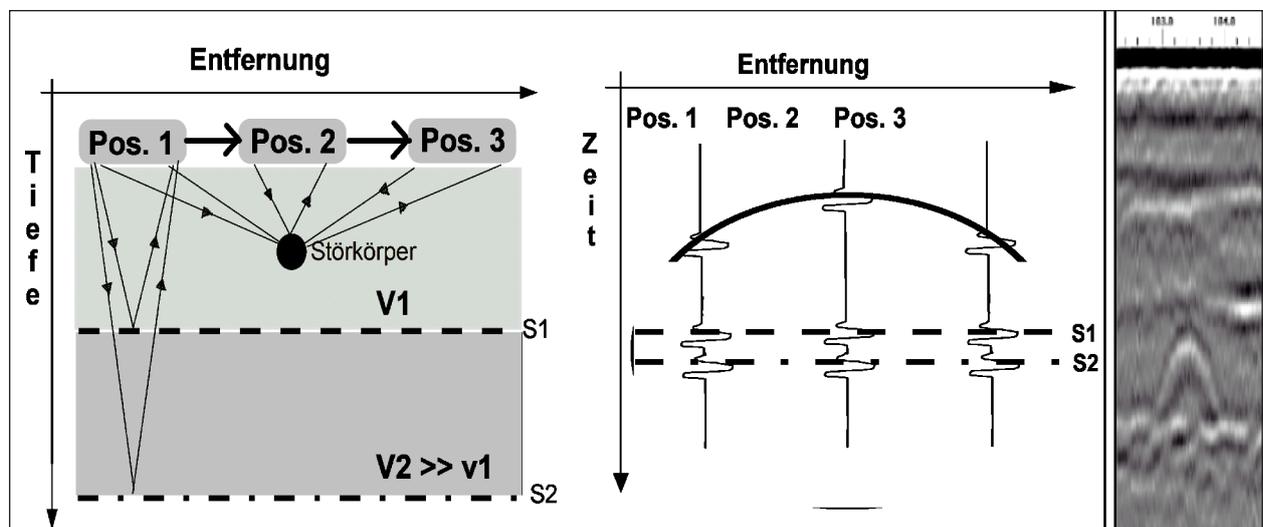


Bild 15: Prinzipielle Darstellung und Entstehung einer Diffraktionshyperbel im Radargramm [HUGENSCHMIDT, 2009] mit ergänzendem Beispiel eines lokalen Hohlraums mit einem Durchmesser $D = 3,0$ cm (rechts) (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz)

und korrekten Wiedergabe der Lage und Tiefe kann das Radarogramm anhand einer Diffraktionshyperbel migriert werden, wodurch diese im Scheitelpunkt fokussiert wird (Kapitel 8.2.3).

3.4.3 Post-Processing

Das Post-Processing umfasst die straßenbautechnische Interpretation der Messdaten sowie deren Umwandlung in ingenieurtechnische Formate und Visualisierungen. So können entsprechende Planunterlagen in Form von Schichtmodellen und Schnittebenen oder Streckenbändern mit stationgetreuer Verortung der Messdaten und Entnahmestellen, zum Beispiel in einem GIS, aufbereitet werden. Auch tabellarische Darstellungen der Messwerte mit entsprechenden Protokollen zu gegebenenfalls durchgeführten Laboruntersuchungen sind in diesem Zusammenhang sachdienlich. Dabei muss es das Ziel sein, dass das Messergebnis die Fragestellung und Zielsetzung erreicht und ein fundiertes ingenieurtechnisch nutzbares Ergebnis vorliegt. Dabei sollte zwischen der datenseitigen Interpretation und der reinen visuellen Interpretation der Messdaten unterschieden werden. Die visuelle Interpretation basiert dabei auf dem ingenieurtechnischen Verständnis des auswertenden Personals und ist fundamental für die Erkennung von lokalen Substanzmerkmalen oder Schädigungen in der Straßensubstanz. Die datenseitige Interpretation basiert, wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, auf einem CSV-Export. Die Datensätze des Datenexports sollten Informationen zu Layern, Stationierungen sowie messtechnischen Größen und Pick-Informationen beinhalten, wobei diese durch die Fragestellung und Zielsetzung der Georadarmessung diktiert werden. Der Informationsgehalt reicht dabei von allgemeinen Datenparametern, wie zum Beispiel der Station im Radarogramm oder der Scannummer, über konkrete Layerinformationen, wie Signallaufzeit, Reflexionsamplitude an der Schichtgrenze, Ausbreitungsgeschwindigkeit und relativer Permittivität, bis hin zu Lageparametern zu Bohrkernentnahmestellen und Koordinaten in horizontaler und vertikaler Richtung.

Jeder der zu exportierenden Datensätze kann hinsichtlich seiner Quantifizierung gefiltert werden, um bedeutsame Teilbereiche sowohl in horizontaler Richtung, durch Eingrenzung der Scans, als auch in vertikaler Richtung, durch die Definition von bestimmten Signallaufzeiten oder Tiefen, hervorzuheben.

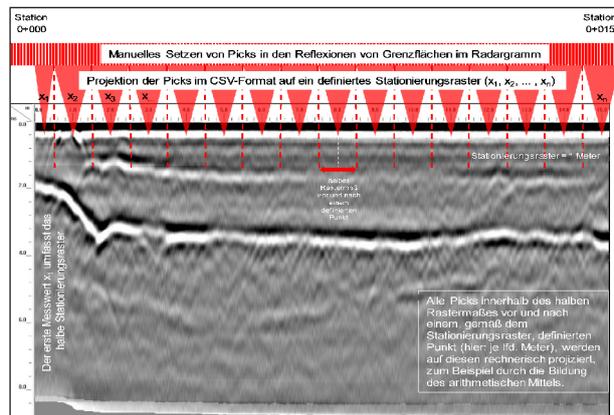


Bild 16: Prinzipskizze der Projektion der Messdaten des Georadars auf vorgegebene Punkte eines definierten Stationierungsrasters (hier: 1 Meter)

Der CSV-Datenstruktur kann im Datenexport ein konstantes Stationierungsraaster (distance Intervall) auferlegt werden. Da bei der Anwendung dieses Stationierungsrasters in der Regel keine Deckungsgleichheit zu den im Radarogramm gesetzten Picks besteht, werden diese im Export durch interpolierte Zwischenpunkte ersetzt. Hierbei ist es zweckmäßig, das Stationierungsraaster mit einem Meter anzugeben, um eine konstante Datenverteilung über den gesamten Untersuchungsabschnitt zu gewährleisten und gleichzeitig eine ausreichende Genauigkeit in der Wiedergabe der Schichtgrenzen zu ermöglichen. Der Export der Datenpunkte unterliegt einer Interpolation der im Radarogramm gesetzten Picks. Dabei wird der arithmetische Mittelwert der Tiefe der Schichtgrenze aller Picks in einer Schichtgrenze innerhalb des halben Rastermaßes vor und hinter der jeweiligen zu exportierenden Station gebildet und schließlich als Punkt auf die Station projiziert (Bild 16).

Zur Aufbereitung der Messdaten und deren straßenbautechnische Interpretation wurde für beide Versuchsprogramme ein Arbeitsplan mit sechs Arbeitsschritten entwickelt, welcher in Bild 17 dargestellt ist. Dieser enthält sowohl Arbeitsschritte des Processings als auch des Post-Processings.

Die CSV-Exporte der Objekt- und Netzebene umfassen folgende Parameter (Anlage C1 und C2):

- Allgemeine Datenparameter: Scan und Distanz (x-Koordinate)
- Layerinformationen: Signallaufzeit (2-Way-Time), Amplitude, Tiefe (Depth als y-Koordinate), Ausbreitungsgeschwindigkeit (Layer Velocity) und relative Permittivität (Layer Diel.)

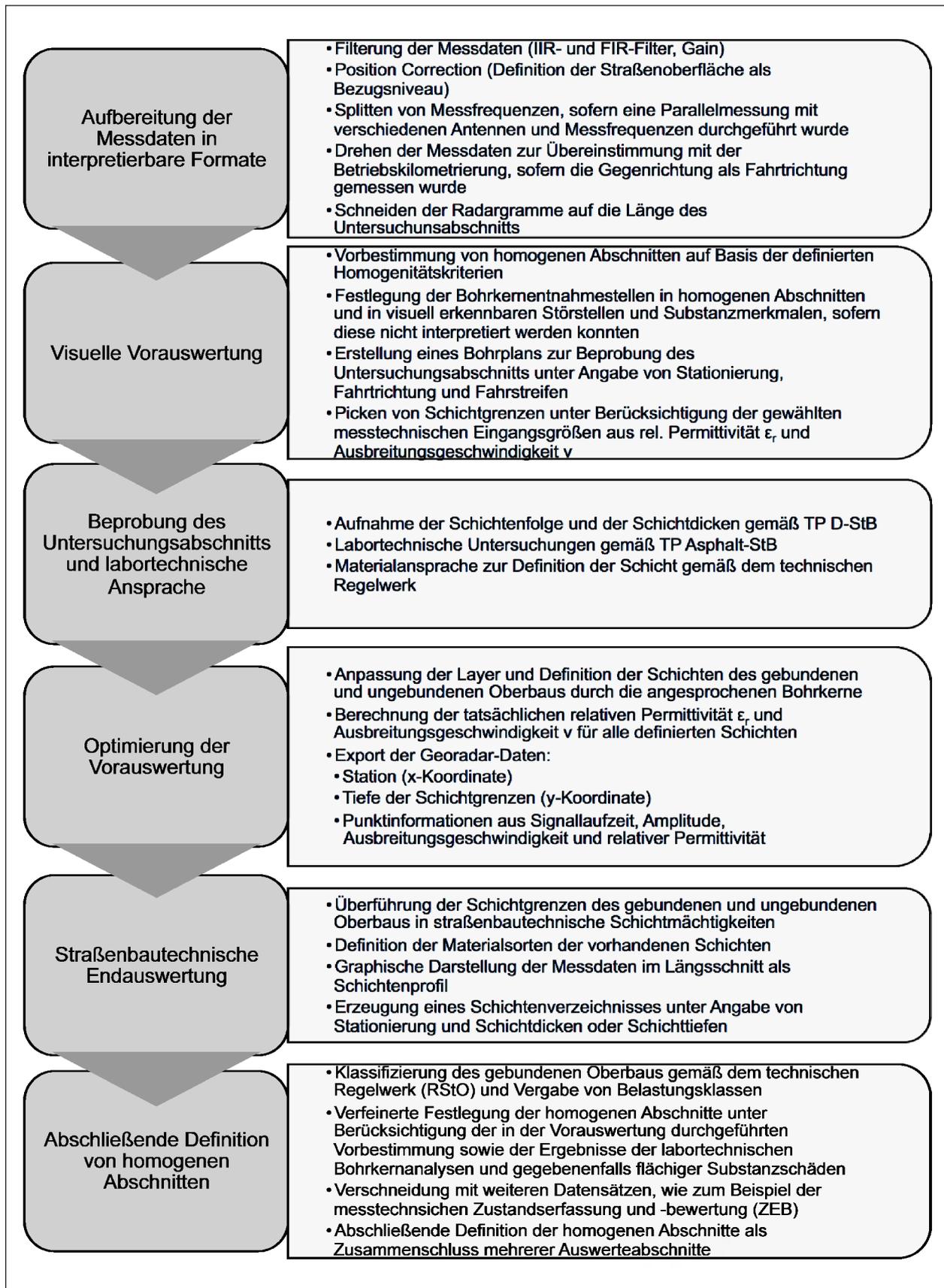


Bild 17: Ablaufdiagramm über die Auswertung und straßenbautechnische Interpretation der Georadar-Daten im Post-Processing

4 Das Georadarverfahren auf Objektebene

4.1 Definition der Objektebene

Als Objekt- oder Projektebene lässt sich im Straßenwesen allgemein ein konkretes Vorhaben bezeichnen, wobei es sich um ein bestimmtes Bauprojekt handelt. Dabei handelt es sich entweder um einen Neubau oder die Sanierung des Bestandes. Zumeist wird in diesem Zusammenhang eine Straße in Gänze oder ein einzelner Abschnitt betrachtet. Die Objektebene kann somit als Teil einer übergeordneten Netzebene gesehen werden und bricht ein Straßennetz oder Straßenteilnetz auf einen kleinräumigen Bereich herunter, welcher einer gezielten Analyse unterzogen wird.

Untersuchungen mit dem Georadarverfahren werden auf dieser Ebene zumeist im Rahmen der Erhaltungsplanung oder Qualitätskontrolle eingesetzt [GOLKOWSKI, 2003]. Innerhalb der Erhaltungsplanung stehen dabei, neben der grundsätzlichen Erkennung von Schichtgrenzen, die Detektion von Hohlräumen, Leitungen und Einbauten sowie Schichtablösungen bzw. unzureichender Schichtenverbund im Vordergrund [ANNAN, 2003; CHEN und SCULLION, 2007; SAARENKETO, 2009]. Im Zuge der Qualitätskontrolle stehen Neubaustrecken im Fokus, wobei das Georadarverfahren als direktes Kontrollinstrument sowohl für die Schichtdicke und den Schichtenverlauf [SAARENKETO und SCULLION, 2000; AL-QADI et al., 2003; AMERYAHIA und MAJIDZADEH, 2006; QUINTUS, 2009] als auch für den Grad der erreichten Verdichtung und den vorhandenen Hohlraumgehalt [SEBESTA und SCULLION, 2003; CHEN et al., 2014] herangezogen werden kann.

Im vorliegenden Anwendungsfall wurde die Objektebene durch eine idealisierte Versuchsstrecke abgebildet, welche einer Straße des Bundesfernstraßennetzes nachempfunden war. Dieses galt sowohl für die Dimensionierung und den Konstruktionsaufbau als auch für die künstlich konstruierten Substanzmerkmale, wie zum Beispiel metallische Ronden, oder Substanzschädigungen. Mit der Versuchsstrecke wurde das Ziel verfolgt, die Einsatzmöglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens exemplarisch mittels eines Versuchsprogramms (Kapitel 4.3) und unter weitestgehend kontrollierten Umgebungsbedingungen, wie elektri-

schen Störquellen oder unter Ausschluss des Straßenverkehrs, zu testen. Auf der Objektebene unterlag das Messverfahren ausschließlich der Witterung als äußeren Einfluss, welcher zu Veränderungen in der Gesamtpermittivität der vorhandenen Schichten und damit zu veränderten Messdaten hätte führen können. Die Untersuchungsergebnisse der Objektebene dienten als Bewertungsgrundlage für die abschließende Definition der Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen und wurden als Ausgangslage für die Nutzung des Verfahrens unter realen Prüfbedingungen auf der Netzebene (Kapitel 6) genutzt.

4.2 Konstruktionsdetails der Objektebene

4.2.1 Allgemeines Baukonzept

Die Versuchsstrecke bestand aus insgesamt drei aufeinanderfolgenden Probefeldern, wobei aufgrund örtlicher Begebenheiten das Probefeld 2 durch die Anordnung eines Kurvenbereichs unterbrochen werden musste (Anlage B1). Gemäß der Leistungsbeschreibung des Forschungsprojektes wurde die Versuchsstrecke für den Anwendungsfall „Bundesfernstraßen, Außerorts, Straßen in Asphaltbauweise“ konzipiert. Der Straßenaufbau wurde in Anlehnung an die RStO gewählt und in der Bauweise Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht (Tafel 1 – Zeile 1) ausgeführt. Zur Dimensionierung der Versuchsstrecke wurden die Belastungsklassen Bk100, als höchste Belastungsklasse für die Probefelder 2 und 3, und Bk3,2, für das Probefeld 1 als niedrigste Belastungsklasse, gewählt. Mit der Wahl der Belastungsklassen wurden die minimalen und maximalen Schichtdicken sowie Tiefen der Schichtgrenzen in der Objektebene untersucht und können a priori auf Zwischenwerte übertragen werden. Dabei gilt es die Zielsetzung des Anwendungsfalls des Forschungsprojektes sowie den idealisierten Zustand der Versuchsstrecke zu berücksichtigen.

Die drei vorgenannten Probefelder gliederten sich jeweils in zwei weitere Teilfelder mit spezifischen bautechnischen Konstruktionsdetails auf (Tabelle 8).

Probefeld 1	Probefeld 1.1	Detektion von Schichtgrenzen und Schichttiefen in der Bk3,2
	Probefeld 1.2	Detektion von Schichtenverbund in der Bk3,2
Probefeld 2	Probefeld 2.1	Detektion von <ul style="list-style-type: none"> • Hohlräumen und PVC-Rohren in der Frostschutzschicht • Fremdmaterial im Asphaltoberbau • durchschlagenden Rissen im Asphaltoberbau • lokalen Absackungen durch Überverdichtung einzelner Asphaltsschichten
Kurvenbereich		
Probefeld 2	Probefeld 2.2	Detektion von <ul style="list-style-type: none"> • Fremdmaterial in der Frostschutzschicht • schichtspezifischen Rissen im Asphaltoberbau • Hohlräumen im Asphaltoberbau
Probefeld 3	Probefeld 3.1	Detektion von Schichtenverbund in der Bk100
	Probefeld 3.2	Detektion von Schichtgrenzen und Schichttiefen in der Bk100

Tab. 8: Spezifische Konstruktionsdetails der Probefelder der Objektebene

Probefeld	Lage	Material	Bodenart	Boden- gruppe	EV ₁ in MN/m ²	EV ₂ in MN/m ²	EV ₂ /EV ₁
1.2	0,00 m bis 0,15 m	anstehender Boden	G, s, u´	GU	66,4	137,4	2,07
	0,15 m bis 0,50 m	anstehender Boden	G, u, s	GU*			
2.1	0,00 m bis 0,20 m	anstehender Boden	G, s, u´	GU	44,0	85,8	1,95
	0,20 m bis 0,50 m	anstehender Boden	G, u, s	GU*			
2.2	0,00 m bis 0,20 m	anstehender Boden	G, s, u´	GU	94,0	184,2	1,96
	0,20 m bis 0,50 m	anstehender Boden	U, t, g, s	UM/TM			
Mischprobe alle Felder		FSS 0/45	G, s´	GI	54,3	168,3	3,10

Tab. 9: Untersuchungsergebnisse zur vorhandenen ungebundenen Lagerfläche und der Frostschutzschicht

4.2.2 Baudokumentation/Bauüberwachung

Die Versuchsstrecke wurde auf einer bestehenden ungebundenen Lager- und Betankungsfläche im Hocheinbau hergestellt und wies unabhängig der gewählten Belastungsklasse die Maße 180,00 m × 3,20 m × 0,65 m (L × B × H) auf. Die Streckenlänge ergab sich aus den einzelnen Probefeldern sowie den bautechnisch bedingten Anrampungen zu Beginn und zum Ende der Versuchsstrecke mit einer Länge von jeweils ca. 5,00 m und dem Kurvenbereich mit einer Länge von 30,00 m. Die Streckenbreite resultierte aus der gerätetechnisch möglichen Fertigerbahn und die Konstruktionshöhe aus der notwendigen Dimensionierung der gemäß den RStO gewählten Belastungsklassen.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Frostsicherheit wurde eine Frostschutzschicht in den Probefeldern 2 und 3 in einer Stärke von 31,0 cm und

im Probefeld 1 aus Gründen der Höhenanpassung durch den verringerten Asphaltoberbau in einer Stärke von 43,0 cm eingebaut.

Die Anforderungen gemäß den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau“ (ZTV SoB-StB) bezüglich des Verformungsmoduls des Planums (vorhandene ungebundene Lagerfläche) von 45 MPa sowie der Frostschutzschicht (FSS) von 120 MPa wurden durch statische Lastplattendruckversuche zuzüglich Probennahme an drei Stationen nachgewiesen (EV₂-Werte) (Anlage B2). In Tabelle 9 sind die dazugehörigen Untersuchungsergebnisse aufgeführt.

Aufgrund der gewählten unterschiedlichen Belastungsklassen bestand der Asphaltoberbau der Versuchsstrecke aus insgesamt vier verschiedenen Asphaltmischgütern:

- Asphaltdeckschicht:
SMA 5 S (Bk3,2) und SMA 11 S (Bk100) jeweils mit Polymermodifiziertem Bitumen 25/55-55 A
- Asphaltbinderschicht:
AC 16 B S mit Straßenbaubitumen 30/45
- Asphalttragschicht:
AC 22 T S mit Straßenbaubitumen 50/70

Die labortechnischen Asphaltmischgutuntersuchungen zur Zusammensetzung und Konformität bezüglich des technischen Regelwerkes wurden anhand von Asphaltmischgutproben als Einzelproben durchgeführt und sind der Anlage B6 zu entnehmen.

Die Bauüberwachung und die damit einhergehenden Kontrollen zu den verschiedenen Asphaltmischgütern sowie der Frostschutzschicht umfassten weitere Prüfungen an der fertigen Leistung. Diese beinhalteten die Untersuchung des Einbauzustandes der Versuchsstrecke. Im Einzelnen wurden Bohrkernproben zur Bestimmung folgender Parameter genutzt:

- Ermittlung des Schichtenverbundes gemäß den „Technischen Prüfvorschriften für Asphalt“ (TP Asphalt-StB – Teil 80).
- Ermittlung der Schichtdicken einzelner Asphalt-schichten und des gesamten Asphaltoberbaus gemäß den „Technischen Prüfvorschriften zur Bestimmung der Dicken von Oberbauschichten im Straßenbau“ (TP D-StB).
- Volumetrische Bestimmungen zu Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad gemäß den TP Asphalt-StB – Teil 8.

Die Anforderungen gemäß den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt“ (ZTV Asphalt-StB) bezüglich des Hohlraumgehaltes, Verdichtungsgrades und des Schichtenverbundes³ wurden mit Ausnahme der Asphaltdeckschicht an der Entnahmestelle BK 237 – 240 erfüllt. Dies hatte jedoch keine Auswirkungen auf die Untersuchungsergebnisse des Georadarverfahrens,

da die Entnahmestellen nicht in den für die Auswertungen relevanten Messlinien des Georadars lagen. Die entsprechenden Prüfprotokolle und Laborergebnisse der Kontrollprüfungen sind in der Anlage B10 aufgeführt.

4.2.3 Detailübersicht Probefeld 1

Das Probefeld 1 gliederte sich in die Teilfelder 1.1 und 1.2 auf und hatte eine Gesamtlänge von 45,00 m. Die Gesamtdicke des Oberbaus betrug 65,0 cm und setzte sich aus einer ungebundenen FSS mit einer Stärke von 43,0 cm und einem Asphaltoberbau von 22,0 cm zusammen.

Der Untersuchungsschwerpunkt lag auf der Detektierbarkeit von Schichtgrenzen und Schichtenverläufen. Das Probefeld 1.1 wies in diesem Zusammenhang einen standardisierten und intakten Straßenaufbau der Belastungsklasse Bk3,2 auf und war als Anfahrbereich entworfen worden. So betrug die Länge dieses Feldes ca. 15,00 m und ermöglichte die Untersuchung von Schichtgrenzen in einem ungestörten Zustand. Die Schichtgrenzen verliefen aufgrund der Dimensionierung und des Einbaus, ausgehend von der Straßenoberfläche des Probefeldes als Nullpunkt, in den in Tabelle 10 dargelegten Tiefen.

Aus den Schichtgrenzen ließen sich die Schichtdicken der einzelnen gebundenen und ungebundenen Schichten ableiten. Innerhalb des Probefeldes 1 variierten diese im Asphaltoberbau zwischen 2,5 cm und 12,0 cm.

Der Aufbau des Probefeldes 1.2 entsprach hinsichtlich der Schichtgrenzen und Schichtdicken dem des Probefeldes 1.1 und diente der Detektierbarkeit von gestörtem Schichtenverbund innerhalb des Asphaltoberbaus. Das Probefeld wies aufgrund der damit verbundenen bautechnischen Besonderheiten eine Länge von ca. 30,00 m auf. In Teilbereichen von ca. 5,00 m Länge wurden in den Grenzflächen verschiedener Asphalt-schichten gezielte Störungen im Schichtenverbund erzeugt. Als Materialien wurden in diesem Zusammenhang eine feine Gesteinskörnung der Körnung 0/2 sowie Wasser als geschlossener Trennfilm aufgebracht (Bild 18).

Aufgrund der abweichenden stofflichen Zusammensetzung in der Grenzfläche wurden Veränderungen in der relativen Gesamtpermittivität sowie unterschiedliche Wellenmuster und Amplitudenausprägungen in den betroffenen Schichtgrenzen erwar-

³ Von dem Anforderungsnachweis zum Schichtenverbund sind die Probefelder 1.2 und 3.1 ausgenommen, da diese gezielte Störungen in der Schichtgrenze aufweisen und somit die Anforderungen an den Schichtenverbund nicht erfüllen können.

Schichtgrenze	Tiefe der Schichtgrenze in cm	Profil gemäß RStO12 – Tafel 1
Straßenoberfläche	0,0	<p style="text-align: center;">Bk3,2</p>
Asphaltdeckschicht/ Asphaltbinderschicht	2,5	
Asphaltbinderschicht/ Asphalttragschicht	10,0	
Asphaltgrenze/ Frostschuttschicht	22,0	
Frostschuttschicht/ Planum	65,0	

Tab. 10: Schichtgrenzen des Probefeldes 1



Bild 18: Künstlich erzeugte Störstellen in der Schichtgrenze durch Absanden, Wasserfilm und Überfettung

tet. Darüber hinaus wurden Teilbereiche mit Längen von ebenfalls ca. 5,00 m durch eine Erhöhung der Ansprühmenge der notwendigen Bitumenemulsion zur Herstellung des Schichtenverbundes überfettet. Dazu wurde lösemittelhaltige Bitumenemulsion C40BF1-S verwendet. Die Ansprühmenge wurde von standardmäßig 250 g/m² [ZTV Asphalt-StB Tabelle 8] auf ca. 1.800 g/m² bis 2.000 g/m² erhöht.

Die Anordnung der Störstellen wurde aufgrund des Schichtenprofils derart gewählt, dass jede mögliche Tiefe und Lage in das Versuchsprogramm aufgenommen werden konnte. Bedingt durch die Dimensionierung des Einbaus ergaben sich daher drei mögliche Schichtgrenzen in unterschiedlichen Tiefen (Anlagen B4 und B5). Der Versatz der Störungen in den Schichtgrenzen vermied eine gegenseitige Einflussnahme in Bezug auf die Georadarmesungen. So betrug die Länge der betroffenen Berei-

che zwischen der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht sowie zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht jeweils 15,00 m. Die jeweiligen Trennmaterien wurden in diesem Zusammenhang in Reihe angeordnet, um eine direkte Überlagerung bei einer Höhendifferenz von 7,5 cm zu vermeiden.

4.2.4 Detailübersicht Probefeld 2

Das Probefeld 2 wurde aufgrund der Gesamtlänge der Versuchsstrecke und der Begrenzung der Lager- und Betankungsfläche durch einen Kurvenbereich in die zwei Teilfelder 2.1 und 2.2 aufgegliedert. Beide Teilfelder waren 25,00 m lang und wurden in der Belastungsklasse Bk100 ausgeführt, wodurch der Aufbau dem des Probefeldes 3 entsprach (Kapitel 4.2.5).

Der Untersuchungsschwerpunkt lag in beiden Teilfeldern auf der Detektierbarkeit von typischen Substanzschädigungen von Asphaltbauweisen. So wurden sowohl in der ungebundenen FSS als auch im Asphaltoberbau entsprechende Substanzschädigungen künstlich in den Einbau integriert. Für die Anordnung wurde in diesem Zusammenhang eine schichtspezifische Verteilung gewählt. Daraus resultierten fünf Substanzschädigungen in der FSS und zwischen sieben und acht Substanzschädigungen in jeder Asphaltenschicht, wodurch insgesamt 35 Substanzschädigungen eingebaut wurden.

Die Auswahl sowie Größe und Ausprägung wurde auf Basis typischer Schadensbilder von Asphaltbefestigungen im Bundesfernstraßennetz getroffen. Im Einzelnen handelte es sich um:

- Risse durch Einschnitte in den Breiten 3,0 mm und 10,0 mm sowohl schichtspezifisch in einzelnen Asphaltenschichten als auch durchschlagend durch den gesamten Asphaltoberbau.
- Vergrößerte Hohlräume in den Durchmessern 0,5 cm (Asphaltdeckschicht), 1,0 cm (Asphalttragschicht obere Lage), 1,9 cm (Asphaltbinder-schicht) und 3,0 cm (Asphalttragschicht untere Lage).
- Einbettung von Fremdmaterial in Form lokaler Nester (Laub, Schlacke, Schotter, Füller, Lehm).
- Lokale Absackungen in den Schichtgrenzen durch dynamische Überverdichtung der Oberfläche der jeweiligen Asphaltenschicht.

Eine Zusammenstellung ist der Fotodokumentation in der Anlage B8 zu entnehmen.

Zur Vermeidung der gegenseitigen Beeinflussung unterlag die Anordnung und Verteilung der Prämisse, dass ein ausreichender horizontaler und vertikaler Abstand vorhanden war. So wurde der Abstand in derselben Profillinie von ca. einem Meter gewählt, um eine gezielte Trennung der Diffraktionshyperbeln (Kapitel 5.2) in den Radargrammen zu erzielen. Zusätzlich wurde ein Randabstand zwischen 50,0 cm und 80,0 cm eingehalten, welcher einerseits montagebedingt durch das eingesetzte Messsystem vorgegeben war (Bild 10) und andererseits bautechnisch, durch die fehlende Randeinfassung der Versuchsstrecke, zur Aufrechterhaltung der inneren Standsicherheit eingehalten werden musste.

Die Überdeckung einzelner Substanzschädigungen konnte lediglich bei den eingebrachten PP-Leerroh-

ren in der FSS nicht vermieden werden. Dies war in der Länge des Probefeldes sowie die Größe der Rohre begründet. Beide eingebrachten Leerrohre, ein perforiertes Rohr quer zur Messrichtung und ein nicht perforiertes Rohr in Längsrichtung, wurden in den Abmessungen von $L = 5,00$ m und $DN 125$ eingesetzt. Die vertikale Überdeckung zu den darüber angeordneten Substanzschädigungen (lokale Absackung in der unteren Lage (UL) der Asphalttragschicht an Station 0+050 sowie Fremdmaterial Lehm an Station 0+062 und Laub an Station 0+064) betrug ca. 35,0 cm. Darüber hinaus wurde das elektromagnetische Eigenschaftsprofil der eingebrachten Fremdmaterialien als unbedenklich hinsichtlich der Störung der Detektierbarkeit der Leerrohre in der FSS eingestuft. Die relativen Permittivitäten sind gegenüber dem umgebenen Asphalt mit $\epsilon_r = 5,00$ bis $9,00$ [FGSV Arbeitspapier Nr. 443A, 2016] als vergleichbar einzustufen. So beträgt die relative Permittivität von trockenem Lehm $\epsilon_r \geq 5,00$ [SCHÖN, 2015] bzw. lehmhaltiger Erde im Trockenzustand $\epsilon_r = 4,00$ bis $6,00$ [CASSIDY, 2011] und ist grundsätzlich vom Wassergehalt abhängig. Das eingesetzte Laub kann näherungsweise als Papier respektive Cellulose betrachtet und mit einer relativen Permittivität von $\epsilon_r = 3,00$ bis $4,00$ angegeben werden [KILIAN und WEBER, 2003].

4.2.5 Detailübersicht Probefeld 3

Das Probefeld 3 entsprach in seiner Aufteilung dem Probefeld 1 und gliederte sich in die zwei Teilfelder 3.1 und 3.2 auf. Die Gesamtlänge betrug ebenfalls 45,00 m und die Gesamtdicke des Oberbaus 65,0 cm. Aufgrund der höheren Belastungsklasse betrug die Stärke der ungebundenen FSS 31,0 cm. Der Asphaltoberbau wies, wie im Probefeld 2, eine Stärke von 34,0 cm auf und gliederte sich in vier Asphaltenschichten auf. Die höhere Dimensionierung erforderte baubedingt eine zweilagige Asphalttragschicht zu je 11,0 cm. Infolge der ebenfalls höheren Schichtdicke der Asphaltdeckschicht von 4,0 cm ist ein Splittmastixasphalt der Körnung 0/5 für besondere Beanspruchung (SMA 5 S) gemäß den ZTV Asphalt-StB nicht regelwerkskonform. Die Körnung wurde daher auf 0/11 angepasst.

Angesichts der geänderten Dimensionierung ergaben sich abweichende Tiefen der Schichtgrenzen beziehungsweise Schichtdicken. Ausgehend von der Oberfläche des Probefeldes als Nullpunkt sind die entsprechenden Schichttiefen in Tabelle 11 aufgeführt.

Schichtgrenze	Tiefe der Schichtgrenze in cm	Profil gemäß RStO12 – Tafel 1
Straßenoberfläche	0,0	<p style="text-align: center;">Bk100</p> <p style="text-align: right;">4 SMA 11 S 8 AC 16 B S 11 AC 22 T S 11 AC 22 T S Σ 34 Frostschuttschicht d = 31 cm 45</p>
Asphaltdeckschicht/ Asphaltbinderschicht	4,0	
Asphaltbinderschicht/ Asphalttragschicht	12,0	
Asphalttragschicht obere Lage/ Asphalttragschicht untere Lage	23,0	
Asphalttragschicht untere Lage/ Frostschuttschicht	34,0	
Frostschuttschicht/ Planum	65,0	

Tab. 11: Schichtgrenzen der Probefelder 2 und 3

Der Aufbau des Probefeldes 3.1 entsprach hinsichtlich der Schichtgrenzen dem Probefeld 3.2 und diente wie das Probefeld 1.2 der Detektierbarkeit von gestörtem Schichtenverbund innerhalb des Asphaltoberbaus. Das Probefeld war hinsichtlich seiner Länge von ca. 30,0 m ebenfalls identisch. Die Herstellung der Störungen in den einzelnen Schichtgrenzen wurde gleichermaßen aus dem Probefeld 1.2 übernommen, wobei aus Gründen der höheren Dimensionierung eine zusätzliche Schichtgrenze innerhalb der zweilagigen Asphalttragschicht vorlag. Die Anordnung der Störstellen wurde aufgrund des Schichtenprofils derart gewählt, dass jede mögliche Tiefe und Lage in das Versuchsprogramm aufgenommen werden konnte (Anlage B5).

Da die Asphalttragschicht einbaubedingt zweilagig ausgeführt wurde, ergab sich eine weitere Schichtgrenze, welche während des Einbaus sowohl mit einem überfetteten und als auch einem abgesandeten Bereich ausgestattet wurde. Diese lagen baubedingt unterhalb der geschädigten Schichtgrenze der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht sowie Asphaltbinder- und Asphalttragschicht. Um eine Detektierbarkeit dennoch zu gewährleisten, wurden diese Bereiche mit einem horizontalen Versatz zwischen 2,00 m und 3,00 m ausgeführt.

Der Untersuchungsschwerpunkt des Probefeldes 3.2 lag auf der Detektierbarkeit von Schichtgrenzen und Schichtenverläufen. Im Zuge dessen wies das Probefeld einen standardisierten und intakten Straßenaufbau der Belastungsklasse Bk100 auf und war als zum Probefeld 1.1 entgegengesetzten An-

fahrbereich konzipiert. So betrug die Länge des Feldes ebenfalls 15,00 m und ermöglichte die Untersuchung von Schichtgrenzen in einem ungestörten Zustand. Aus den Tiefen der Schichtgrenzen ließen sich die Schichtdicken der einzelnen gebundenen Schichten ableiten. Diese variierten im Asphaltoberbau zwischen 4,0 und 11,0 cm und stellten somit einer Ergänzung zu den Schichtgrenzen des Probefeldes 1.1 dar.

4.3 Versuchsprogramm der Objektebene

4.3.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die Versuchsstrecke unterlag der Prämisse, dass eine umfassende und detaillierte Detektion durch das Georadarverfahren erzielt werden konnte. Da ein System mit fahrzeugmontierten Hornantennen zum Tragen kam und dadurch die Straßensubstanz entlang einzelner Messlinien detektiert wurde, waren für eine vollständige Erfassung mehrere parallele Messlinien notwendig. Aufgrund der Breite der Versuchsstrecke von 3,20 m wurden somit insgesamt drei Messlinien vorgesehen. Jede Messlinie beinhaltete zwei Messprofile mit den Messfrequenzen 1.000 und 2.000 MHz.

Die Messlinien verteilten sich gleichmäßig über die Breite der Versuchsstrecke und wurden ausgehend von dem Probefeld 1 in Richtung des Probefeldes 3 stationiert. Der Randabstand betrug sowohl in Stationierungsrichtung (rechter Rand) als auch ent-

gegen der Stationierungsrichtung (linker Rand) 0,50 m. Der Montageabstand der eingesetzten Hornantennen betrug 1,10 m, wodurch die Messungen ein Rastermaß von 0,55 m aufwiesen. Ausgehend von dem rechten Rand der Versuchsstrecke beinhaltet jeder Messdurchlauf des Versuchsprogramms somit sechs Messungen (Doppelbestimmung der Mittelachse durch die Messlinien 1 und 3), wobei die Messlinien 1 und 2 in Stationierungsrichtung und die Messlinie 3 entgegen der Stationierungsrichtung verliefen (Bild 19). Durch die Wahl der Messlinien war allerdings im Versuchsprogramm die direkte Vergleichbarkeit der genutzten Messfrequenzen aufgrund der nicht vorhandenen Deckungsgleichheit der Messlinien vor dem Hintergrund der Datenanalyse und Datenauswertung nicht gegeben.

Aufgrund der herstellungsbedingten Notwendigkeit eines Kurvenbereichs zwischen den Probefeldern 2.1 und 2.2 wiesen die drei aufgezeigten Messlinien unterschiedliche Messlängen auf. Die für die Auswertung der Messdaten vordringlich relevante Messfrequenz von $f = 2.000$ MHz beinhaltet in diesem Zusammenhang die folgenden Messlängen:

- Messlinie 1 $\cong 172,0$ m
- Messlinie 2 $\cong 171,0$ m
- Messlinie 3 $\cong 168,0$ m

Angesichts der Streckencharakteristik und dem aus der Örtlichkeit resultierenden Hocheinbau, war die Messgeschwindigkeit auf der Versuchsstrecke auf Schrittgeschwindigkeit ($\cong 7,0$ km/h) begrenzt.

Zur Eruierung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse sowie zur Feststellung potenzieller Messunsicherheiten unterlag jede Messlinie einer Dreifachbestimmung durch Wiederholungsmessungen. Dabei bedurfte die Vergleichbarkeit und Verifizierung der Daten einer stationsgetreuen Wiederholbarkeit, wodurch die Messlänge durch die Festlegung von Start- und Endpunkten exakt definiert werden musste. Darüber hinaus musste der Randabstand möglichst konstant gehalten werden, um Abweichungen in der Messlinie durch das Fahrverhalten und den Fahrweg weitestgehend zu vermeiden. Die Frostschutzschicht der Versuchsstrecke wurde aus diesem Grund an den Anfangs- und Endpunkten der Probefelder 1.1 bis 2.1 sowie 2.2 bis 3.2 (Anlage B4) mit Stabstählen über die gesamte Streckenbreite versehen. Diese sollten wegen der metallischen Oberfläche starke Einzelreflexionen im Radargramm und somit fixe Markierungspunkte erzeugen (Bild 20).

Im Anschluss an das Messprogramm des Georadars wurde die Versuchsstrecke zu Kontroll- und Kalibrierungszwecken beprobt. Grundsätzlich ist die Beprobung eines Untersuchungsabschnitts von der Zielsetzung und Fragestellung des Georadars abhängig [FGSV Arbeitspapier Nr. 443A, 2016]. Besteht diese ausschließlich in der Festlegung von ho-

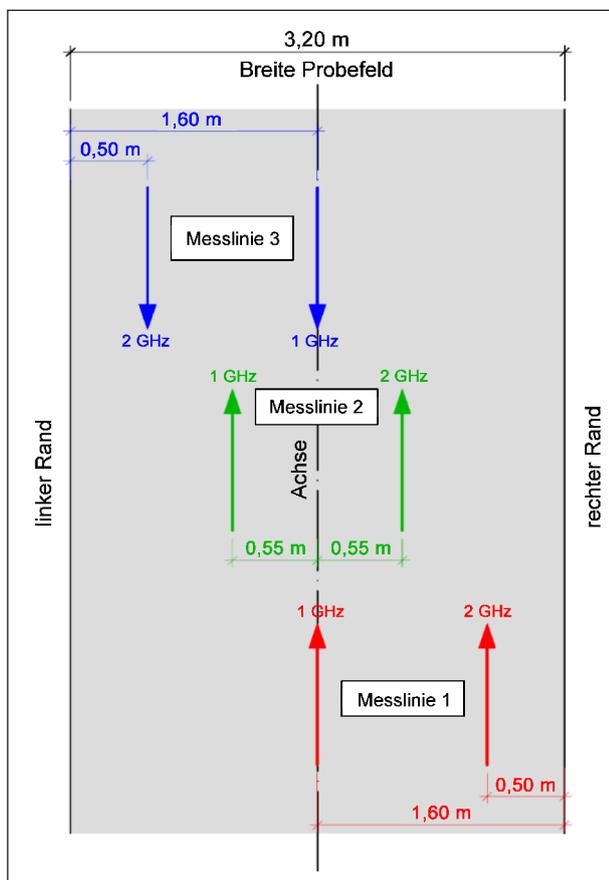


Bild 19: Anordnung der Messlinien auf der Objektebene



Bild 20: Stabstahl in der FSS zur Stationierungskontrolle

mogenen Straßenabschnitten, welche zum Beispiel anhand der Schichtenfolge erfolgt, kann durchaus auf eine Beprobung verzichtet werden [GOLKOWSKI, 2003]. Da zumeist allerdings auch Aussagen hinsichtlich der Dimensionierung und des Straßenaufbaus gefordert sind, welche über die alleinige Betrachtung der Schichtenfolge hinausgehen, gilt es die tatsächlichen Schichtdicken und Baustoffe in situ festzustellen [FUNK et al., 1996]. In diesem Zusammenhang sind die Georadar-Daten durch die entnommenen Proben zu kalibrieren, um die tatsächlichen Tiefen der Schichtgrenzen im Radarogramm abzubilden [FÖRSTER und HOTHAN, 2001; AL-QADI und LAHOUAR, 2005; WILLETT et al., 2006].

4.3.2 Witterungsbedingungen

Das durchgeführte Versuchsprogramm basierte auf Trockenmessungen, um den Einfluss von Feuchtigkeit auf das elektromagnetische Eigenschaftsprofil der Baumaterialien und die Straßensubstanz der Versuchsstrecke zu vermeiden. Die Messungen wurden bei einer Lufttemperatur von ca. 6,0 °C sowie einer Bodentemperatur von ca. 9,0 °C durchgeführt (Tabelle 12). Die zur Verfügung stehenden Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes sind angesichts der Entfernung zum Standort der Versuchsstrecke allerdings als Näherungswerte anzusehen.

4.3.3 Variation der Messfrequenz

Die Messfrequenz hat maßgeblichen Einfluss auf die Wellenlänge der in die Straßensubstanz abgestrahlten elektromagnetischen Impulse und damit auf das vertikale Auflösungsvermögen des Georadars. Dabei sind die hier angeführten Messfrequenzen die Antennenmittelfrequenzen eines breiteren Frequenzspektrums der Bandbreite B.

Die im Versuchsprogramm aufgegriffene Variation der Messfrequenz verfolgte das Ziel, die gemäß

des aktuellen Stands der Technik vorgeschlagene zweckmäßige Messfrequenz zur Detektion der Straßensubstanz insgesamt sowie des gebundenen Oberbaus im Detail auf den vorliegenden Anwendungsfall zu übertragen. In diesem Zusammenhang wurden neben den standardisierten Messfrequenzen 1.000 und 2.000 MHz Testmessungen mit weiteren Antennen unterschiedlicher Messfrequenzen auf der Versuchsstrecke durchgeführt. Dabei handelte es sich um bodengekoppelte Handantennen mit den Messfrequenzen 300, 800, 1.600 sowie 2.600 MHz (Bild 21).

Im Zuge der Detektion von Substanzmerkmalen wurden diese Frequenzen mit Ausnahme der Messfrequenz 2.600 MHz als Grundlage für die visuelle Erkennbarkeit und Interpretation genutzt. Somit sind diese Messfrequenzen ebenfalls Gegenstand



Bild 21: Detektion eines künstlich erzeugten Hohlraums in der Asphaltbinderschicht

Messstation ^{*)}	Entfernung zur Versuchsstrecke (Luftlinie) in km	Lufttemperatur (2,0 m) in °C ^{**)}	Bodentemperatur (5,0 cm) in °C ^{**)}	Temperatur im Boden (-5,0 cm) in °C ^{**)}	Niederschlags-höhe in mm ^{**)}
Eslohe	10,8	6,0	6,7	-	0,0
Arnsberg-Neheim	17,5	-	-	9,1	-

^{*)} Wahl der zur Versuchsstrecke nächstgelegenen Wetterstation mit Messdaten
^{**)} Datenbasis: Deutscher Wetterdienst (DWD), Werte bearbeitet, Tagesmittel

Tab. 12: Wetterdaten Trockenmessung vom 26.10.2016

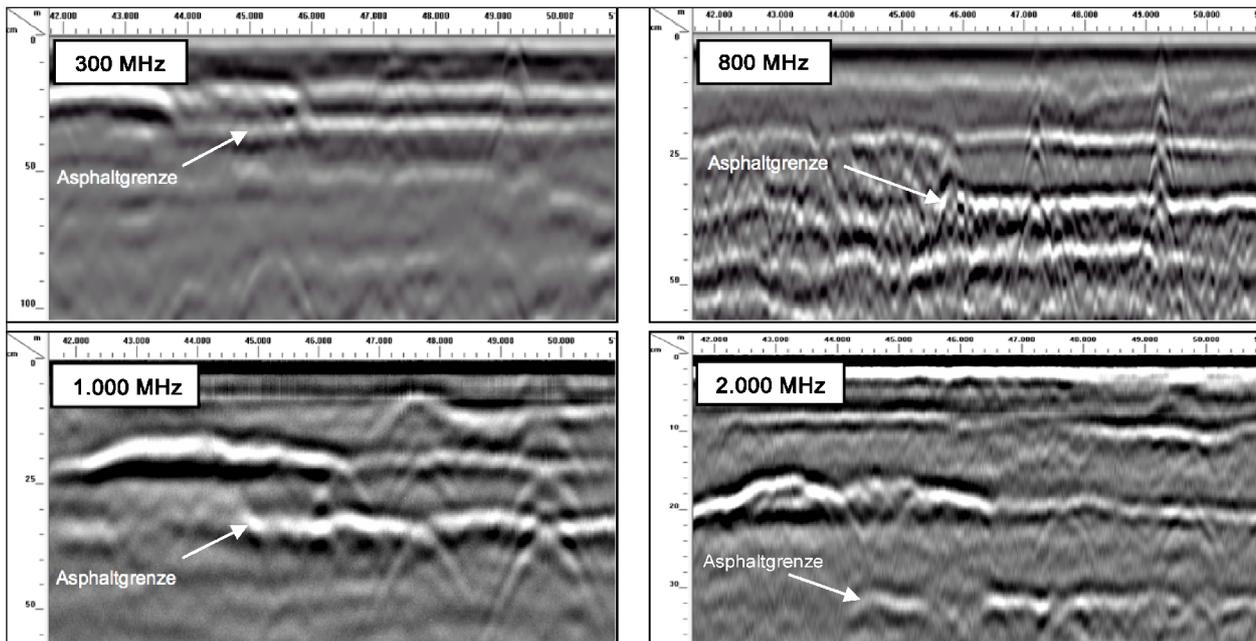


Bild 22: Visueller Vergleich der Messfrequenzen 300, 800, 1.000 und 2.000 MHz

des Objektkatalogs in der Anlage D1, welcher die visuellen Charakteristika von Substanzmerkmalen differenziert nach Messfrequenz und Scanrate gegenüberstellt. Im weiteren Verlauf der Messdatenauswertung und -bewertung wurden diese Messfrequenzen allerdings nicht genutzt, da vor dem Hintergrund der Fragestellung und Zielsetzung eine zweckmäßige Auswahl der Messfrequenz nach aktuellem Stand der Technik gewählt wurde. Die Messdaten der verschiedenen Messfrequenzen stellen somit vordringlich Ergänzungen dar, welche im Zuge des weiteren Forschungsbedarfs und für zukünftige Auswertungen genutzt werden können.

Gemäß des aktuellen Stands der Technik sind Radarantennen mit Messfrequenzen größer als 1.000 MHz für die Erfassung des gebundenen Oberbaus nutzbar [GOLKOWSKI, 2003]. Mittels der auf der Versuchsstrecke durchgeführten Messungen wurde ersichtlich, dass im Bereich der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht das vertikale Auflösungsvermögen bei der Nutzung einer Messfrequenz von 1.000 MHz unzureichend ist, um die Schichtgrenzen aufzulösen. Infolge der geringen Schichtdicken der Asphaltdeckschicht mit $d = 2,5$ cm in den Probefeldern 1.1 und 1.2 wird daher eine höhere Messfrequenz und damit ein schärferes vertikales Auflösungsvermögen als sinnvoll empfunden (Bild 22).

Aus diesem Grund wurde eine Vorauswahl getroffen, welche zweckmäßige Messfrequenzen für die Auflösung des gebundenen und ungebundenen

Oberbaus nach aktuellem Stand der Technik genutzt werden können. So wurde die Auswertung des gebundenen Oberbaus anhand der Messfrequenz 2.000 MHz und die des ungebundenen Oberbaus anhand von 1.000 MHz durchgeführt. Innerhalb der Auswertung der Objektebene lag allerdings der Fokus auf dem Asphalt oberbau, sodass die Frostschutzschicht nicht Gegenstand der Auswertung ist.

4.3.4 Variation der Scanrate

Die Variation der Scanrate diente der Eruiierung einer zweckmäßigen Datendichte vor dem Hintergrund der Darstellung von Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen im Radargramm ohne die Skalierung in Längsrichtung durch ergänzende Schritte im Processing zu verändern. Vor dem Hintergrund der Messgeschwindigkeit gilt es ein adäquates Verhältnis zwischen Messgeschwindigkeit, Scanrate (Scans je Meter) und Anzahl an Samples je Scan herzustellen, um eine gute Darstellung und Auflösung im Radargramm zu gewährleisten [FÖRSTER und HOTHAN, 2001] (Bild 23).

Es wurden Georadarmessungen mit den Scanraten 10, 20, 50 und 100 Scans/m durchgeführt und hinsichtlich der Praktikabilität in Bezug auf die Datenauswertung und Dateninterpretation miteinander verglichen. Jede Scanrate unterlag im Rahmen der Eruiierung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse dreier Wiederholungsmessungen.

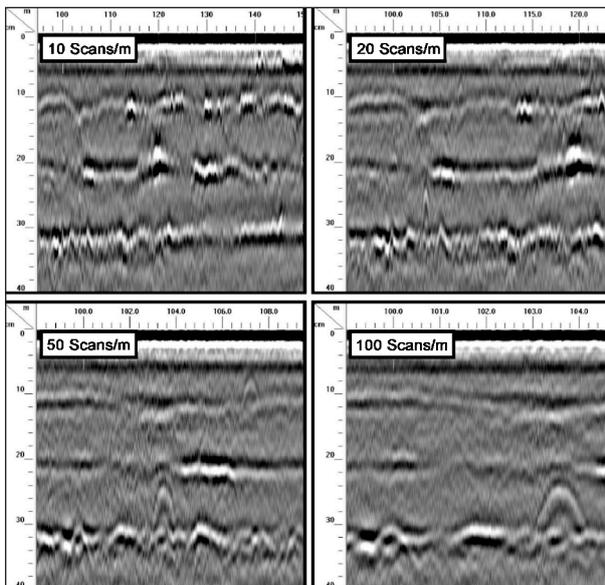


Bild 23: Visueller Vergleich der Datendichte der Scanraten 10, 20, 50 und 100 Scans/m

4.3.5 Beprobung der Objektebene

Zur Ermittlung des Ist-Zustandes des Konstruktionsaufbaus der Objektebene wurde diese mittels Entnahme von Bohrkernen beprobt, da durch Umgebungseinflüsse, die Materialtechnologie und die Maschinenteknik Abweichungen vom geplanten Soll-Zustand auftreten können. Dazu zählen insbesondere Abweichungen in der Höhenlage und in der Schichtdicke einzelner Schichten im gebundenen und ungebundenen Oberbau. Die Anhaltswerte der RStO dienen in diesem Zusammenhang ausschließlich als Richtwerte.

Im Zuge der Auswertung von Georadar-Daten dient die Beprobung gleichermaßen zur Schaffung einer Referenzgröße und Kalibrierungsgrundlage, mittels derer die gewonnenen Messdaten an den tatsächlichen Konstruktionsaufbau und die örtlichen Verhältnisse angepasst werden. An den entnommenen Bohrkernen wird die wahre Tiefe jeder vorhandenen Schichtgrenze gemessen und als Kalibrierpunkt im Radargramm verwendet. Der auf diese Weise durch die Bohrkernprobe abgebildete homogene Abschnitt wird entsprechend der Werte des Kalibrierpunktes in der Tiefenachse verschoben. Darüber hinaus dient eine Beprobung als Interpretationshilfe in Radargrammbereichen, welche durch zusätzliche Reflexionen oder erheblichem Signalrauschen nur eingeschränkt interpretierbar sind. Nach aktuellem Stand der Technik werden ein bis zwei Kalibrierbohrkerne je homogenem Straßenabschnitt als ausreichend empfunden, wobei der gleichartige

Konstruktionsaufbau der Straßensubstanz das wesentliche Homogenitätskriterium darstellt.

Aufgrund der identischen Bauweise der Probefelder 1.1 und 1.2 sowie 2.1 bis 3.2 der Versuchsstrecke konnten diese als homogene Abschnitte definiert werden. Die Definition wurde anhand der Homogenitätskriterien überprüft, wobei die rechnerische Überprüfung mithilfe des Verlaufs der dimensionierungsrelevanten Asphaltgrenze in Kapitel 8.3.5 dargelegt ist. Daher bestand nicht die Notwendigkeit der Entnahme eines Kalibrierbohrkerns aus jedem Probefeld. Es wurde an dieser Stelle als ausreichend empfunden, je Belastungskategorie respektive Dimensionierung mindestens einen Bohrkern zu entnehmen. Aus Gründen der Praktikabilität wurde diese Entnahme mit der gerasterten Entnahme von Bohrkernen je laufenden Meter (Fall 3 der folgenden Fallstudie) kombiniert.

Im Zuge des Variantenvergleichs des Versuchsprogramms wurde durch den Forschungsnehmer eine Fallstudie entwickelt, welche drei Unterscheidungen in der Beprobung vorsah:

1. Auswertung und Verarbeitung der Georadar-Daten ohne eine Kalibrierung (Fall 1).
2. Auswertung und Verarbeitung der Georadar-Daten mit einer Kalibrierung, wobei je homogenem Abschnitt und Belastungskategorie mindestens ein Bohrkern genutzt wurde (Fall 2).
3. Gerasterte Entnahme von Bohrkernen je laufenden Meter in den Messlinien der Messfrequenz $f = 2.000 \text{ MHz}$ als direkte Korrelationsgrundlage zwischen Georadar-Daten und Bohrkernen für eine Studie zur relativen Permittivität und Abweichungsanalyse (Kapitel 8.1) (Fall 3).

Die Eruiierung der Genauigkeit des Georadarverfahrens bei der Bestimmung der Lage von Schichtgrenzen ist ein vordringliches Forschungsziel des vorliegenden Anwendungsfalls. Diese wurden im Fall 1 ausschließlich auf Basis von Radargrammen und der damit verbundenen Abschätzung der Schichtdicken durch die Signallaufzeit eruiert, ohne eine direkte Ansprache der Straßensubstanz vorzunehmen. Diesbezügliche theoretische Ansätze gehen in erster Linie von einer idealisierten und bekannten Straßensubstanz aus, wodurch eine Betrachtung in situ nicht zwangsweise notwendig ist [LOULIZI et al., 2003]. Einen konkreten Anwendungsbezug findet diese Vorgehensweise im Zuge der Festlegung von homogenen Abschnitten einer

Straße oder eines Straßenabschnittes, ohne konkret die Dicke einzelner Schichten in die Betrachtung einzubeziehen [GOLKOWSKI, 2003]. Die Aussagekraft und die Qualität der Messdaten dieses Falls sind allerdings als eher gering einzuschätzen und bergen durch die fehlende direkte Ansprache der Straßensubstanz ein erhöhtes Risiko von Fehlinterpretationen.

Die Entnahme einzelner Kalibrierbohrkerne je homogenem Straßenabschnitt (Fall 2) stellt den aktuellen Stand der Technik zum Georadarverfahren dar, wobei die Anzahl und Verortung einer Einzelfallbetrachtung unterliegen [FGSV Arbeitspapier Nr. 443A, 2016]. Die Entnahme dient der nachträglichen Anpassung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Impulse sowie der relativen Permittivität, um die Tiefe und Lage der Schichtgrenzen im Radargramm an die wahren Tiefen, welche am Bohrkern bestimmt wurden, anzugleichen. Die nachträgliche Anpassung der Messdaten führt erfahrungsgemäß zu einer höheren Genauigkeit des Verfahrens [LAHOUAR, 2003; EVANS, 2005; WILLETT et al., 2006; Evans, R. D., 2009; EDWARDS und MASON, 2011].

Die auf einem Meter gerasterte Entnahme von Bohrkernen als dritter Fall der Fallstudie diene der direkten Korrelation zwischen den Georadar-Daten und der tatsächlichen Tiefe der Schichtgrenzen am Bohrkern und damit der Bestimmung der potenziellen Genauigkeit des Verfahrens. Hintergrund war die Erforschung der Einflussgrößen auf die relative Permittivität von Asphalt. Darüber hinaus wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit durch diese Faktoren maßgeblich beeinflusst und kann durch die Struktur und Zusammensetzung der Straßensubstanz stetig variieren. Durch die direkten Gegenüberstellungen bestanden die Möglichkeit der Eruiierung dieser Änderungen sowie der Definition und Quantifizierung von Wertespannen, Abweichungen und Abhängigkeiten von einzelnen Einflussgrößen. Darüber hinaus konnte der Einfluss von gestörtem Schichtenverbund, wie zum Beispiel durch einen geschlossenen Wasserfilm, in die Untersuchung integriert werden. Auf der Versuchsstrecke wurden in diesem Zusammenhang insgesamt 145 Bohrkern je Messlinie als Datengrundlage entnommen (Bild 24).

Aus Gründen der Praktikabilität wurden in den Messlinien 1 und 3 Bohrkern mit einem Durchmesser von $D = 100,0$ mm und in der Messlinie 2 mit einem Durchmesser von $D = 150,0$ mm entnom-



Bild 24: Anordnung des Stationierungsrasters der Bohrkern in den Messlinien des Georadars auf der Objektebene

men, welche eine Überprüfung des Schichtenverbundes gemäß den TP Asphalt-StB – Teil 80 ermöglichen.

Innerhalb der Fallstudie dienen die Fälle 1 und 3 der technischen und statistischen Erforschung des Georadarverfahrens und stellen keine direkten Bestandteile der eigentlichen Prozesskette zum Georadarverfahren dar. Im Fall 3 wird in diesem Zusammenhang durch den kontinuierlichen Abgleich zwischen den Georadar-Daten und den Bohrkernanalysen die größte Genauigkeit erwartet, um die tatsächliche Straßensubstanz im Radargramm abzubilden. Aufgrund der Vielzahl an Bohrkernen ist dieser Fall allerdings aus baupraktischer und ökonomischer Sicht nur bedingt umsetzbar und daher von theoretischer Bedeutung.

5 Messergebnisse der Objektebene

5.1 Ermittlung von Schichtgrenzen unter weitestgehend idealisierten Bedingungen

5.1.1 Feststellung des tatsächlichen Konstruktionsaufbaus

Gemäß des Baukonzeptes und den Konstruktionsdetails wurden die Standardbauweisen der RStO – Tafel1 – Zeile1 „Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht“ in den Belastungsklassen Bk3,2 und Bk100 verwendet. Dabei handelt es sich um Richtwerte des technischen Regelwerkes, welche nicht den tatsächlichen Konstruktionsaufbau widerspiegeln müssen. Vor dem Hintergrund der Feststellung der Genauigkeit des Georadars in der Wiedergabe von Schichtgrenzen gilt es allerdings den tatsächlichen Konstruktionsaufbau als Soll-Zustand anzusetzen.

Die Ermittlung erfolgte im vorliegenden Anwendungsfall anhand des Falls 3 der Fallstudie zur Beprobung der Objektebene. Die dazu im 1m-Raster entnommenen Bohrkern in allen drei Messlinien lieferten ein ausreichendes Bild des tatsächlichen Konstruktionsaufbaus im Längs- und Querprofil. Dieses konnte anschließend mit den Georadar-Daten verglichen werden (Kapitel 8.1). Der ungebundene Oberbau ist nicht Gegenstand der Auswertung.

Die Bohrkern jeder Messlinie wurden hinsichtlich der Belastungsklasse und der Asphalt-schicht bzw. Asphaltgrenze unterschieden. Als Messdaten wurden in diesem Zusammenhang die Dicke jeder Asphalt-schicht sowie des gesamten Asphalt-oberbaus verwendet. Die Laborergebnisse der Schichtdickenmessungen an den entnommenen Bohrkernen gemäß TP D-StB sind der Anlage F2 zu entnehmen. Jede Messlinie wurde dabei anhand einer deskriptiven Statistik charakterisiert und zur Ermittlung von Abweichungen mit den Richtwerten der RStO in Bezug gesetzt. Die deskriptive Statistik umfasst die folgenden Parameter:

- Arithmetischer Mittelwert \bar{x} der Dicke einer Schicht nach (5.1).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

Mit

x_i : i-ter Messwert der Dicke einer Asphalt-schicht oder der Asphaltgrenze in cm

n: Anzahl der Messwerte als Stationen einer Messlinie gemäß dem definierten Stationierungs-raster

- Standardabweichung s der Dicke einer Asphalt-schicht oder der Asphaltgrenze nach (5.2).

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.2)$$

Mit

x_i : i-ter Messwert der Dicke einer Asphalt-schicht oder der Asphaltgrenze in cm

\bar{x} : Arithmetischer Mittelwert der Dicke einer Asphalt-schicht oder der Asphaltgrenze in cm

s^2 : Varianz der Dicke einer Asphalt-schicht oder der Asphaltgrenze in cm^2

n: Anzahl der Messwerte als Stationen einer Messlinie gemäß dem definierten Stationierungs-raster

- Minimalwert x_{\min} der Schichtdicke oder der Asphaltgrenze in cm.
- Maximalwert x_{\max} der Schichtdicke oder der Asphaltgrenze in cm.
- Spannweite R als Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert in cm.

Die Analyse der positiven und negativen Abweichungen umfasst die folgenden Bestandteile:

- Abweichungen zwischen der Schichtdicke am Bohrkern und dem Richtwert der RStO:
 - Anzahl der Abweichungen N.
 - Maximale Abweichung absolut in cm.
 - Maximale Abweichung relativ zum Richtwert der RStO in %.

Die Abweichungen wurden folgendermaßen definiert:

- Negative Abweichungen:
Schichtdicke am Bohrkern < Richtwert RStO
- Positive Abweichungen:
Schichtdicke am Bohrkern > Richtwert RStO
- Identisches Wertepaar:
Schichtdicke am Bohrkern = Richtwert RStO

Die Ergebnisse der deskriptiven Statistik sowie der Abweichungsanalyse sind der Anlage F3 zu entnehmen. Darüber hinaus sind die Messdaten in Form von Schichtenprofilen visualisiert. Die Bezugsgröße der Stationierung ist dabei die Mittelachse der Versuchsstrecke mit einer Länge von 170,00 m.

Es zeigt sich, dass die Richtwerte der RStO in allen Asphalt-schichten sowie in der Asphaltgrenze im Wesentlichen unterschritten werden (Tabelle 13). Ein möglicher Grund dafür sind die fehlenden Widerlager an den Fahrbahn-rändern, wodurch seitliche Verdrückungen, welche durch den Baustellen-verkehr, die Verdichtungsvorgänge sowie durch das Eigengewicht der vorhandenen Schichten, begünstigt werden.

Geltungsbereich der Abweichungen im Konstruktionsaufbau	Maximal mögliche Anzahl an Wertepaaren	Messlinie der Versuchsstrecke	Anzahl Wertepaare mit Abweichungen ^{*)}	
			negativ	positiv
Alle Asphalt-schichten beider Belastungsklassen	45 x 3 + 100 x 4 = 535 Wertepaare	Messlinie 3	353	143
		Messlinie 2	416	88
		Messlinie 1	427	64
Asphaltgrenze beider Belastungsklassen	45 + 100 = 145 Wertepaare	Messlinie 3	137	6
		Messlinie 2	142	2
		Messlinie 1	144	1

^{*)} Die Summe der Anzahl an Wertepaaren muss nicht mit der maximal möglichen Anzahl an Wertepaaren übereinstimmen. Sofern ein identisches Wertepaar vorliegt, wird der Wert nicht in der Auswertung berücksichtigt.

Tab. 13: Summenbetrachtung der Abweichungen zwischen Bohrkern und Richtwert der RStO auf der Objektebene

Die negativen Abweichungen zum Richtwert der RStO nehmen dabei mit zunehmender Tiefe im Konstruktionsaufbau zu und erreichen somit in der Asphalttragschicht bzw. in der Asphaltgrenze ihr Maximum. Dieses liegt zwischen -3,3 cm (Messlinie 3 in der Bk3,2) und -5,3 cm (Messlinie 2 in der Bk3,2). Die positiven Abweichungen bleiben mit Ausnahme der Asphaltdeckschicht nahezu konstant und liegen bei maximal 1,4 cm in der Asphaltgrenze der Belastungsklasse Bk100 in der Messlinie 3.

5.1.2 Wiedergabe der Schichtgrenzen mit dem Georadarverfahren

Der Konstruktionsaufbau der Straßensubstanz wird beim Georadarverfahren durch die Interpretation von Schichtgrenzen ermittelt. Diese stellen Grenzflächen dar, an denen die abgestrahlten elektromagnetischen Impulse gebrochen, gedämpft und reflektiert werden, wobei die Art und Ausprägung von der Beschaffenheit der Grenzfläche sowie den elektromagnetischen Eigenschaften der durchstrahlten Medien abhängt. Je größer der Unterschied der elektromagnetischen Eigenschaften der Schichten ist, desto größer ist der Anteil des Signals, welcher reflektiert wird und desto ausgeprägter ist die Signalamplitude. Zur Bestimmung der Tiefe einer Schichtgrenze ist darüber hinaus die Signallaufzeit t als messtechnische Größe in die Berechnung nach (3.17) einzubeziehen.

Im vorliegenden Anwendungsfall wurden die Schichtgrenzen im Konstruktionsaufbau anhand von drei verschiedenen Auswertemethoden ermittelt, welche durch die genutzte Softwarelösung vorgegeben waren. Die durchgeführten Auswertungen basierten in diesem Zusammenhang auf der Wahl

der Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit v der elektromagnetischen Impulse. Dabei war der Asphaltoberbau der maßgebende Untersuchungsgegenstand. Der ungebundene Oberbau wurde in der Datenanalyse in Ermangelung einer eigenen zusätzlichen Beprobung nicht weiter betrachtet. Die zur Datenauswertung genutzte Messfrequenz betrug $f = 2.000$ MHz.

Die drei Auswertemethoden lassen sich wie folgt charakterisieren:

1. Die Schichtgrenzen basieren auf einem definierten Wert für die Ausbreitungsgeschwindigkeit v und für die relative Permittivität ϵ_r . Die relative Permittivität entspricht der vertikalen Messeinstellung zum Zeitpunkt der Messung und wurde mit 6,25 angesetzt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v betrug entsprechend 11,99 cm/ns. Die Festlegung basierte auf dem Erfahrungshintergrund des auswertenden Personals und war grundsätzlich frei wählbar. Die Ermittlung der Tiefe einer Schichtgrenze erfolgte nach (3.17). Da kein Bezug zu den entnommenen Bohrkernproben hergestellt wird, handelt es sich um unkalibrierte Georadar-Daten.
2. Die Schichtgrenzen basieren auf der Ermittlung von Reflexionskoeffizienten, welche unter Berücksichtigung der Antennengeometrie und Ausbreitung der elektromagnetischen Impulse, zur Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit v und der relativen Permittivität ϵ_r genutzt werden [Geophysical Survey Systems Inc., 2015a]. Die relative Permittivität wird mittels der Amplitudenverhältnisse an den Grenzflächen sowie unter Nutzung des Kalibrierscans über einer Metallplatte (Bild 11) berechnet. Aus der relativen Permittivität wird nach (3.8) die Ausbreitungsge-

schwindigkeit v und schließlich nach (3.17) die Tiefe der Grenzfläche ermittelt. Durch den fehlenden Bezug zu den Bohrkernproben handelt es sich ebenfalls um unkalibrierte Georadar-Daten.

- Die Schichtgrenzen basieren auf einem definierten Wert für die Ausbreitungsgeschwindigkeit v und aus (3.8) abgeleitet für die relative Permittivität ϵ_r . Diese wird dabei von den an den Bohrkernen ermittelten Tiefen der Schichtgrenzen nach (3.17) abgeleitet. Die Berechnungsmethodik kehrt sich in diesem Fall um, da von der eigentlichen Zielgröße auf die Eingangsgrößen zurückgerechnet wird. Die korrespondierende Beprobung der Objektebene ist in Kapitel 4.3.5 beschrieben, wobei im Allgemeinen Entnahmestellen zu wählen sind, welche den erwarteten Konstruktionsaufbau möglichst gut und interpretierbar im Radargramm abbilden. Dabei ist das Radargramm im Vorhinein anhand einer visuellen Vorauswertung in homogene Abschnitte einzuteilen und mindestens eine Entnahmestelle in jedem homogenen Abschnitt vorzusehen. Die auf diese Weise ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeiten werden für den als homogen definierten Untersuchungsabschnitt als konstant angesetzt. Daraus resultiert gleichermaßen eine konstante relative Permittivität.

Die Objektebene umfasste durch die Wahl der Belastungsklassen insgesamt zwei homogene Abschnitte. Die Kalibrierung der Georadar-Daten erfolgte aus Gründen der Praktikabilität an Bohrkernen, welche in der Fallunterscheidung 3 der Beprobung sowieso in den Messlinien des Versuchsprogramms (Bild 19) zu entnehmen waren. Dadurch, dass die Auswertemethode eine Beprobung des Untersuchungsabschnitts beinhaltet, handelt es sich um kalibrierte Georadar-Daten. Diese Herangehensweise stellt den allgemeinen Stand der Technik in der Durchführung und Auswertung von Georadar-Daten dar. Die relative Permittivität, als vertikaler Darstellungsparameter zum Zeitpunkt der Messung, wird durch die bei der Beprobung ermittelten Größen der Ausbreitungsgeschwindigkeit v entsprechend modifiziert.

Angesichts der Vielzahl an Bohrkernen bestand auf der Objektebene nicht die Notwendigkeit der Festlegung von einzelnen Bohrkernen zur Kalibrierung der Georadar-Daten. Es wurde vielmehr durch das vorhandene Entnahmeraster eine Auswahl hinsicht-

lich der Station und der Asphaltsschicht getroffen, an welcher die Reflexion der Schichtgrenze im Radargramm optisch gut zu erkennen und zu interpretieren war, wobei beide homogene Abschnitte mindestens einen Kalibrierungspunkt aufzuweisen hatten. An diesen Stationen sind sowohl die Tiefe der Schichtgrenze als auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die relative Permittivität identisch.

Die entsprechenden Tabellen zu den gewonnenen Messdaten sind in der Anlage C1 aufgeführt und fußen auf den im Processing erstellten CSV-Exporten, wobei abweichend zu den in Kapitel 3.4.2 aufgeführten Parametern ausschließlich die Signallaufzeit, die Tiefe der Grenzfläche, die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die relative Permittivität als Datensätze hinterlegt sind. Mit Ausnahme der Signallaufzeit, welche den Picks im Radargramm bzw. den interpolierten Zwischenpunkten direkt als Messgröße zugeordnet wird, sind zusätzlich deren Abweichungen zueinander aufgeführt. Dies ist ebenfalls wesentlicher Bestandteil der in Kapitel 8.1.2 dargelegten Abweichungsanalyse zwischen den entnommenen Bohrkernen und den Georadar-Daten. Die Anlage umfasst ausschließlich die erste Messung jeder Messlinie. Die Wiederholungsmessungen zur Eruierung der Reproduzierbarkeit von Messergebnissen sowie zur Feststellung von Messunsicherheiten liegen ausschließlich in der Anlage C1 vor.

Ferner stellt die Anlage F4 die Messergebnisse der ermittelten Tiefen der Schichtgrenzen sowohl der Auswertemethoden des Georadars als auch des tatsächlichen Konstruktionsaufbaus, ausgedrückt durch die im 1m-Raster entnommenen Bohrkern, in Längsprofilen dar (Bild 25). Die Bohrkern stellen dabei den tatsächlichen Konstruktionsaufbau quasi flächig dar. Die drei beschriebenen Auswertemethoden des Georadars sind als Vergleichswerte durch eine Liniendarstellung aufgeführt, wobei die Methoden 1 und 3, durch die Festlegung der relativen Permittivitäten durch einen vertikal versetzten Verlauf je homogenem Abschnitt charakterisiert sind. Die Signallaufzeit war für alle drei Auswertemethoden identisch.

Die Messergebnisse der Anlagen sind in Messreihen mit folgenden Unterscheidungskriterien zusammengefasst:

- Messlinie der Objektebene (Messlinie 1 bis 3)
- Scanrate (10, 20, 50 und 100 Scans/m)

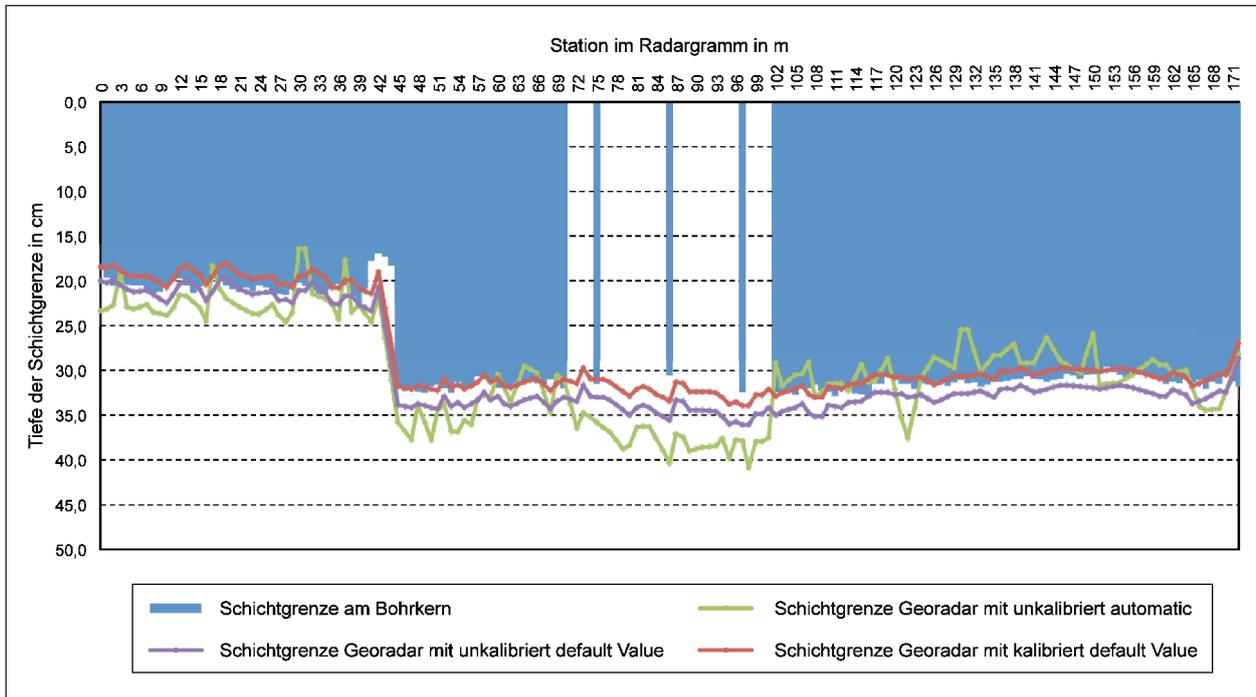


Bild 25: Längsprofil der Messergebnisse der Auswertemethoden des Georadars und der Bohrkern des 1m-Rasters für die Asphaltgrenze der Messlinie 1 (Scanrate = 10 Scans/m)

- Schichtgrenze im gebundenen Oberbau oder Asphaltgrenze
- Belastungsklasse als Maß für die Schichtenfolge

Jede Messreihe wird durch eine zusätzliche mathematisch-statistische Auswertung analysiert (Kapitel 8.1.1). Diese beinhaltet eine deskriptive Statistik mit den folgenden Parametern (Anlage J1):

- Arithmetischer Mittelwert \bar{x} nach (5.1)

- Standardfehler des arithmetischen Mittelwertes nach (5.3)

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5.3)$$

- Standardabweichung s nach (5.2)

- Varianz s^2 nach (5.4)

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.4)$$

- Minimalwert x_{\min}
- Maximalwert x_{\max}
- Spannweite R als Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert

5.2 Mustererkennung von Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen

Die Mustererkennung von Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen erfolgte auf Objektebene einerseits durch die Interpretation der im Radargramm erkennbaren Charakteristika und andererseits durch die Wellenmuster im O-Scope. Eine quantitative Auswertung erfolgte durch die Auswertung der Signallaufzeit und Amplitudenausprägung an den Grenzflächen der Schädigungen, zum Beispiel durch den Übergang von Asphalt zu Luft im Falle von Rissen oder Hohlräumen.

Als Substanzmerkmale wurden in diesem Zusammenhang alle Strukturen in der Straßensubstanz definiert, welche keine Schädigung und keine Schichtgrenze darstellten. Dazu zählten der vorhandene Aufbauwechsel sowie die zur Schichtdickenmessung eingebrachten metallischen Ronden im Zuge der Bauüberwachung. Die eingebrachten Stabstähle in den Anfangs- und Endpunkten der Probefelder, zur Generierung von fixen Start- und Endpunkten in den Radargrammen der Georadaruntersuchungen (Bild 20), konnten aufgrund der Tiefenlänge in der FSS von ca. 50,0 cm ausschließlich mit den ergänzenden Messungen der Messfrequenzen 300 und 800 MHz detektiert werden (Bild

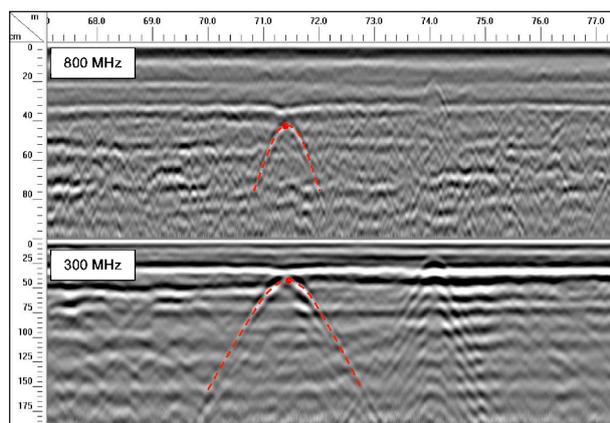


Bild 26: Diffraktionshyperbel des Stabstahls in der FSS an Station 0+071 der Messlinie 2

26). Da das Einmessen auf der Versuchsstrecke gleichzeitig anhand seitlicher Markierungsstäbe durchgeführt wurde, stellt dies insgesamt keinen Nachteil dar. Die Stabstäbe waren auf der Versuchsstrecke näherungsweise an den Stationen 0+000, 0+070, 0+100 und 0+170 eingebracht worden.

Die Art und Ausprägung der lokal künstlich erzeugten Substanzschädigungen sind als Bestandteil der Probefelder 2.1 und 2.2 der Versuchsstrecke in Kapitel 4.2.4 sowie in der Anlage B5 aufgeführt. Die flächenhaften Substanzschädigungen in Form von gestörtem Schichtenverbund in den Probefeldern 1.2 und 3.1 sind in den Kapiteln 4.2.3 und 4.2.5 aufgeführt.

Die visuellen Charakteristika von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen sind in Form von Radargrammausschnitten in einem Katalog in der Anlage D1 dargestellt. Jedes Substanzmerkmal und jede Substanzschädigung ist durch eine farbliche Markierung hervorgehoben, welche die Erkennbarkeit im Radargramm erleichtert.

Die Zielsetzung des Kataloges ist die zweckmäßige Festlegung von messtechnischen Größen, welche die Erkennung und Interpretation im Radargramm grundlegend ermöglichen. Aus diesem Grund wurde der Variantenvergleich im Versuchsprogramm hinsichtlich der Messfrequenz (Kapitel 4.3.3) und der Scanrate (Kapitel 4.3.4) auf der Objektebene durchgeführt. Insofern unterscheidet der Katalog in den Darstellungen nach diesen beiden messtechnischen Größen. Es gilt anzumerken, dass der Katalog dabei ausschließlich die erzeugten Substanzschädigungen und keine Substanzmerkmale umfasst.

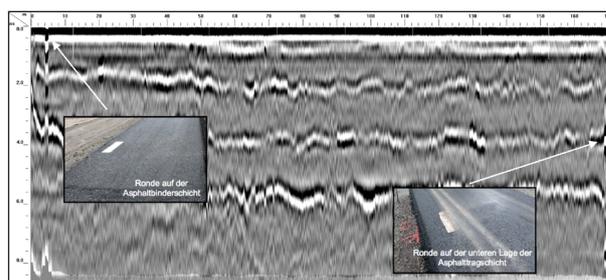


Bild 27: Radargramm im Graustufenformat mit visuellen Charakteristika von Ronden in der Straßensubstanz in der Messlinie 3 (Display Gain = 30, f = 2.000 MHz)

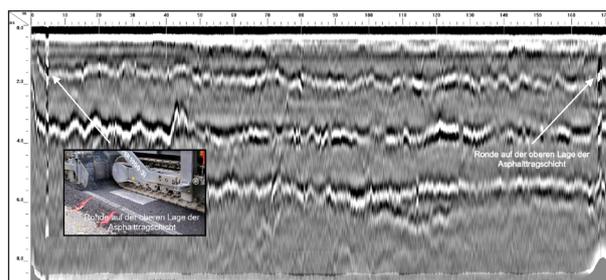


Bild 28: Radargramm im Graustufenformat mit visuellen Charakteristika von Ronden in der Straßensubstanz in der Messlinie 1 (Display Gain = 30, f = 2.000 MHz)

Die Bilder 27 und 28 zeigen die Reflexionen von metallischen Ronden, welche zur Schichtdickenmessung mittels Wirbelstromverfahren im Zuge der Qualitätssicherung genutzt wurden. Da es sich um metallische Strukturen handelt, entstehen in der Straßensubstanz charakteristische Reflexionen.

Aufgrund der Konstruktionsdetails der einzelnen Probefelder waren die metallischen Ronden ausschließlich in den nicht geschädigten Bereichen der Versuchsstrecke angeordnet. Dazu zählten die Probefelder 1.1 (Bk3,2) und 3.2 (Bk100) sowie der Kurvenbereich.

6 Das Georadarverfahren auf Netzebene

6.1 Definition der Netzebene

Gemäß den „Richtlinien für integrierte Netzgestaltung“ (RIN) wird die Netzebene als Verkehrsnetz definiert, welches aus den Netzelementen Strecke und Knotenpunkt besteht. Die Abfolge dieser Netzelemente wird demnach als Netzabschnitt bezeichnet, welcher als Verkehrsweg die gleiche Verbindungsfunktion sowie Kategoriengruppe aufweist. Bei einem Wechsel der Kategoriengruppe beginnt

ein neuer Netzabschnitt. Somit kann die Netzebene als Zusammenschluss gleichdefinierter Netzabschnitte charakterisiert werden, welche zusammenhängend ein Verkehrsnetz mit derselben Verbindungsfunktion und Kategoriengruppe ergeben. Im vorliegenden Anwendungsfall bezieht sich die Forschungsfrage auf die Ebene des Bundesfernstraßennetzes, welches in Bezug auf die Baulast durch den Bund aus Bundesautobahnen und Bundesstraßen besteht. Dieses umfasst gemäß der RIN die Kategoriengruppen Autobahnen (AS) und Landstraßen (LS).

Im Rahmen der Eruiierung der Einsatzmöglichkeiten und -grenzen des Georadarverfahrens wird dieses allerdings nicht in Form eines Zusammenschlusses gleichdefinierter Netzabschnitte gesehen, welche mittels des Georadarverfahrens untersucht werden. Dies würde implizieren, dass entsprechende Untersuchungen im Rahmen eines Verkehrsnetzes oder Teilverkehrsnetzes zusammenhängend betrachtet und durchgeführt werden. Vielmehr wird die Netzebene im vorliegenden Anwendungsfall als Ebene definiert, auf welcher Untersuchungen mit dem Georadarverfahren durchgeführt werden. Es wurden daher einzelne Netzabschnitte gezielt ausgewählt und untersucht. Diese wurden in der durchgeführten Datenauswertung ebenfalls separat betrachtet und nicht als zusammenhängendes Netz gewertet. Jede Bundesfernstraße beinhaltet somit eine als Untersuchungsabschnitt definierte Teilstrecke.

Das Versuchsprogramm basierte auf insgesamt fünf Bundesautobahnen und fünf Bundesstraßen, deren Untersuchungsabschnitte in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Sachsen-Anhalt liegen. Die Verteilung ermöglichte ein breiteres Spektrum an Bauweisen und regionalen Begebenheiten und damit einen größeren Querschnitt in der Aus- und Bewertung.

Die auf den Bundesfernstraßen durchgeführten Georadarmessungen sind dem realen Praxisfall nachempfunden, da die Messungen im fließenden Verkehr stattgefunden haben und die detektierte Straßensubstanz aus Konstruktionsaufbau sowie gegebenenfalls vorhandener Substanzmerkmale unbekanntes Größen darstellten, welche durch das Georadar erfasst werden sollten. Aufgrund der zur Objektebene differierenden Rahmenbedingungen des Bundesfernstraßennetzes galt es die notwendigen messtechnischen Eingangsgrößen an diese anzupassen. Vordergründig ist dies der höheren Mess-

geschwindigkeit geschuldet, welche direkten Einfluss auf die mögliche Scanrate hat. Während auf der Objektebene baubedingt mit einer geringen Fahrgeschwindigkeit gemessen und dadurch auch höhere Scanraten in das Versuchsprogramm aufgenommen werden konnten, mussten die Messungen auf den Bundesfernstraßen zur Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses mit einer entsprechend höheren Messgeschwindigkeit durchgeführt werden. In Abhängigkeit von dem Verkehrsaufkommen wurden die Georadarmessungen mit Geschwindigkeiten zwischen 50,0 und 80,0 km/h auf den Bundesstraßen und 80,0 km/h auf den Bundesautobahnen durchgeführt. Die Gesamtlänge der Untersuchungsabschnitte betrug ca. 80 Kilometer, wobei die zur Auswertung genutzten Daten jeweils nur einen Teilbereich abdeckten, um einen unverhältnismäßig hohen Aufwand in der Auswertung bei gleichem Mehrwert für die Bearbeitung der Forschungsfrage zu vermeiden.

6.2 Untersuchungsstrecken im Bundesfernstraßennetz

Die Teilstrecken der Bundesfernstraßen, welche als Untersuchungsabschnitte ausgewählt wurden, unterlagen der Prämisse, dass die Zustandsdaten der messtechnischen ZEB hohe Zustandswerte und damit hohe Schädigungsgrade im Bereich des Teilstreckenzustands (TWSUB) respektive in den dazugehörigen Zustandswerten aufwiesen. Gemäß den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen“ (ZTV ZEB-StB) zählen dazu:

- Unebenheiten in Längsrichtung durch Allgemeine Unebenheiten (ZWAUN)
- Unebenheiten in Querrichtung durch Spurrinntiefe (ZWSPT)
- Risshäufungen, Netzrisse und Einzelrisse (ZWRIS)
- Flickstellen (ZWFLI) und aufgesetzte Flicker (ZWAFLI)

Darüber hinaus basierte die Auswahl der Untersuchungsabschnitte auf der Vorgabe eines mit der Objektebene vergleichbarem Konstruktionsaufbaus in Asphaltbauweise sowie einer vergleichbaren Belastungsklasse. Entsprechende Aufbaudaten lagen als Auszüge aus den Straßeninformationsbanken der beteiligten Bundesländer vor.

Die Festlegung der Teilbereiche innerhalb der Untersuchungsabschnitte, welche als Datengrundlage für die Aus- und Bewertung der Georadar-Daten genutzt wurden, erfolgte anhand von Befahrungsvideos durch den Forschungsnehmer. Dazu wurden gezielt Bereiche für die Detektion von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen sowie ein weitestgehend unbeschädigter Bereich, um den Konstruktionsaufbau zu bestimmen, ausgewählt. Durch die Eingrenzung mittels der Befahrungsvideos wurde sichergestellt, dass der aktuelle Zustand als Referenz für die festgestellten Substanzmerkmale in die Auswertung einbezogen wurde. Die dem Forschungsnehmer durch die Bundesländer zu Verfügung gestellten Daten der messtechnischen ZEB lagen aufgrund der zyklischen Durchführung zum Teil bis zu vier Jahre zurück und hätten daher nur näherungsweise den aktuellen Streckenzustand wiedergeben können. Das Risiko von Fehlinterpretationen und Diskrepanzen in der Auswertung wurde auf diese Weise minimiert. In der Anlage G1 sind Kartenausschnitte zur Lage der Untersuchungsabschnitte im Netz sowie ergänzende Streckeninformationen zur Örtlichkeit und zum Straßenzustand aufgeführt.

Im Einzelnen wurden folgende Untersuchungsabschnitte betrachtet:

- BAB 2 zwischen AS Bielefeld-Ost und AS Gütersloh
- BAB 45 zwischen AS Meinerzhagen und AS Drolshagen
- B1 zwischen Bundesstraßenkreuz B1/B236 und Autobahnkreuz Dortmund/Unna
- B54 zwischen B51 und Rinkerode (OD Münster-Hiltrup)
- B236 zwischen B54 und Dortmund-Wambel (AS Hannöversche Straße)
- BAB 61 zwischen AS Boppard und AS Rheinböllen
- B10 zwischen AS Wilgartswiesen und AS Hauenstein
- BAB 14 zwischen AS Könnern und AS Löbejün
- BAB 38 zwischen AS Merseburg-Süd und Autobahnkreuz Rippachtal
- B79 zwischen Aue-Fallstein (L89) und L91 (Landesgrenze Niedersachsen)

Die Georadarmessungen auf den Bundesautobahnen wurden mit Ausnahme der BAB 2 ausschließlich auf den Hauptfahrstreifen durchgeführt. Hintergrund war die Notwendigkeit der Abstimmung der messtechnischen Größen und der möglichen Messgeschwindigkeit, um ein adäquates Messergebnis zu erzielen sowie der Umstand, dass die messtechnische ZEB auf den ausgewählten Untersuchungsstrecken ebenfalls für die Hauptfahrstreifen durchgeführt wurde. Auf den Bundesstraßen wurden beide Fahrtrichtungen aufgenommen und bei mehrstreifigen Fahrbahnen und Fahrtrichtungen jeweils der Hauptfahrstreifen. Die entsprechenden Befahrungsunterlagen aus Videos und Fotos sind den Anlagen E4 und G2 zu entnehmen.

Auf Basis einer Vorauswertung der Georadar-Daten wurde jeder Untersuchungsabschnitt visuell in homogene Abschnitte eingeteilt. Dabei basierte die Festlegung auf im Radargramm feststellbare Aufbauwechsel entweder anhand der Veränderung der Schichtenfolge im Asphaltoberbau oder einer lokalen erheblichen Änderung der Tiefe der Asphaltgrenze. Die Definition der entsprechenden Homogenitätskriterien ist in Kapitel 8.3 beschrieben.

Die Verortung der Messdaten und Entnahmestellen der Beprobung erfolgte auf Netzebene auf Basis der Betriebskilometrierung der Bundesfernstraße. Die Entnahmestellen wurden aus verkehrstechnischen Gründen jeweils in der Fahrstreifenmitte verortet und nicht in den Rollspuren, welche montagebedingt näherungsweise mit den Messlinien des Georadars zusammenfielen. Der laterale Abstand zu den Messlinien des Georadars betrug aufgrund dessen ca. 30,0 bis 40,0 cm. Es gilt zu berücksichtigen, dass somit keine Deckungsgleichheit zwischen Bohrkern und Radargramm vorliegt. Die Messlängen wurden durch Markierungspunkte am Start- und Endpunkt der jeweiligen Messung sowie an der Streckenbeschilderung an die Kilometrierung angepasst. Sowohl die Betriebskilometrierung als auch die lokale Stationierung der Georadar-Daten sind daher Bestandteil der Messergebnisse (Kapitel 7.1).

6.3 Beprobung der Netzebene

Die Beprobung der Untersuchungsabschnitte diente der Feststellung des tatsächlichen Konstruktionsaufbaus der jeweiligen Bundesfernstraße. Dazu wurden die Dicke der einzelnen Asphaltsschichten sowie die Gesamtdicke des Asphaltoberbaus be-

stimmt. Darüber hinaus dienten die Bohrkerne als Referenz für die örtlichen Verhältnisse und gaben die Schichtenfolge für den jeweiligen als homogen definierten Streckenabschnitt wieder. Die Festlegung des jeweiligen homogenen Abschnittes erfolgte in der Vorauswertung innerhalb des Processings durch den Forschungsnehmer im Vorfeld der Beprobung. Die Bohrkerne dienten ferner der Kalibrierung der Georadar-Daten und entsprachen in diesem Zusammenhang dem Fall 2 der auf der Objektebene durchgeführten Fallstudie hinsichtlich der Kalibrierung der Georadar-Daten.

Ergänzend wurden durch den Forschungsnehmer Entnahmestellen festgelegt, an denen eine geschädigte Straßensubstanz angenommen wurde. Diese Annahme wurde einerseits mittels der visuellen Auswertung der Radargramme getroffen und andererseits von den Messergebnissen der Objektebene abgeleitet. Als wesentliche Substanzschädigungen wurden in diesem Zusammenhang ein unzureichender Schichtenverbund sowie Risse, sowohl durchschlagend als auch spezifisch in einzelnen Schichten, gesehen.

Durch die hohen Schädigungsgrade der untersuchten Bundesfernstraßen und der zeitnah geplanten Sanierung im Anschluss an die Georadarmessungen durch die jeweilige Landesstraßenbaubehörde, war es nicht auf allen Strecken möglich, eine eigene Beprobung zu einem späteren Zeitpunkt durchzuführen. Daher wurden insgesamt drei Strecken durch externe Prüfinstitute beprobt bzw. anhand von Bestandsunterlagen charakterisiert, um Referenzwerte der betroffenen Untersuchungsabschnitte im geschädigten Zustand zu erhalten:

- BAB 14 in Sachsen-Anhalt
- B10 in Rheinland-Pfalz
- B1 in Nordrhein-Westfalen

Auf der BAB 14 in Sachsen-Anhalt wurde die Beprobung durch die Prüfgesellschaft für Straßen- und Tiefbau mbH & Co. KG (PST) aus Bernburg anhand eines Bohrplans des Forschungsnehmers durchgeführt. Die Beprobung des Untersuchungsabschnitts der B10 in Rheinland-Pfalz wurde durch die Prüfstelle des Landesbetriebs Mobilität (Baustoffprüfstelle Bingen) durchgeführt. Auf der B1 wurden Bestandsunterlagen der Stadt Dortmund von älteren Beprobungen zur Bewertung der Straßensubstanz genutzt.

In allen drei Fällen wurden entweder die Bohrkerne selbst oder die Ergebnisse der labortechnischen Untersuchungen dem Forschungsnehmer zu Verfügung gestellt. Im zweiten Fall hatte dies allerdings zur Folge, dass die Entnahmestellen nicht auf Basis der Georadar-Daten des Forschungsnehmers festgelegt wurden, da die beiden entsprechenden Untersuchungsabschnitte zeitnah nach der Messung saniert wurden. Somit wurden dem Forschungsnehmer die Ergebnisse der Laboruntersuchungen derjenigen Bohrkerne zu Verfügung gestellt, welche im Zuge der Erhaltungsplanung der Landesstraßenbaubehörden zur Feststellung der örtlichen Verhältnisse entnommen wurden.

Die Laborergebnisse der Schichtdickenmessungen gemäß TP D-StB an den entnommenen bzw. durch externe Prüfinstitute zu Verfügung gestellten Bohrkerne sind der Anlage G4 zu entnehmen.

7 Messergebnisse der Netzebene

7.1 Wiedergabe von Schichtgrenzen im Praxisfall

Die Vorgehensweise in der Ermittlung von Schichtgrenzen in der Straßensubstanz durch die Definition und Interpretation von Grenzflächen wurde im Rahmen des Processings und Post-Processings erläutert. Die Auswertemethoden unterscheiden sich zum Vorgehen auf der Objektebene insofern, dass keine theoretisierten Fallstudien durchgeführt werden, sondern vielmehr der reale Praxisfall angewendet wird. Im Zuge dessen wurden auf den Untersuchungsabschnitten zunächst die Auswertemethode 1 der Objektebene angewendet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wurde dabei mit 11,99 cm/ns festgelegt, woraus sich eine relative Permittivität von $\epsilon_r = 6,25$ ergibt. Diese Festlegungen gehören zu den messtechnischen Eingangsgrößen zum Zeitpunkt der Messung und sind ausschließlich Bestandteil der visuellen Vorauswertung der gewonnenen Messdaten.

Ausgehend von den auf diese Weise gewonnenen Messdaten wurden die Untersuchungsabschnitte in homogene Abschnitte eingeteilt, welche anschließend durch die Verortung von Entnahmestellen beprobt wurden, um Referenzpunkte für die Kalibrierung der Messdaten zu generieren. Die Festlegung von homogenen Abschnitten erfolgte mittels der

entwickelten Homogenitätskriterien (Kapitel 8.3.1) respektive der daraus resultierenden Aufbauwechsel. Anhand der entnommenen Proben wurden die Georadar-Daten innerhalb der als homogen definierten Abschnitte kalibriert und somit an die vorhandenen örtlichen Verhältnisse angepasst. Dies entspricht der Auswertemethode 3 der Objektebene sowie dem Fall 2 der Fallstudie zur Beprobung der Objektebene. Die Beprobung beschränkte sich auf den gebundenen Oberbau, sodass ausschließlich Bohrkern aus den vorhandenen Untersuchungsabschnitten entnommen wurden.

Die quantitative Auswertung beschränkte sich im vorliegenden Anwendungsfall auf die Ermittlung der Tiefe der vorhandenen Schichtgrenzen. Die Genauigkeit in der Wiedergabe des tatsächlichen Konstruktionsaufbaus konnte mangels Vergleichswerte durch zusätzliche Proben nicht festgestellt werden. Der Fokus der Auswertung lag auf der grundsätzlichen anwendungsbezogenen Durchführung einer Georadarmessung im Praxisfall und legte somit die entsprechende Vorgehensweise im Processing und Post-Processing sowie die damit einhergehenden Messdaten dar. Die Messdaten wurden in einer CSV-Datenstruktur exportiert, welche in der Anlage H aufgeführt ist.

Ein Beispiel, wie ein abschließendes Ergebnis einer Georadarmessung visualisiert und im Zuge von Managementaufgaben genutzt werden kann, ist in Kapitel 12 aufgeführt. Dies impliziert sowohl die Aufbereitung der Messdaten in ingenieurtechnisch nutzbaren Formaten, wie zum Beispiel Längsprofilen, als auch eine Rohformatierung der Messdaten, sodass dem Auftraggeber eine eigenständige Weiterverarbeitung der Messdaten ermöglicht wird.

7.2 Mustererkennung von Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen

Die Mustererkennung von Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen auf der Netzebene diente der Überführung der auf der Objektebene unter weitestgehend idealisierten Bedingungen ermittelten visuellen Charakteristika in den realen Praxisfall. Die grundlegenden Zielsetzungen waren in diesem Zusammenhang sowohl die Validierung der Messergebnisse der Objektebene zu längs und quer zur Messrichtung verlaufenden Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen als auch die Schaffung

einer Übersicht über auftretende Merkmale und Schädigungen unter realen Bedingungen.

Die Vorgehensweise zur Objektebene unterscheidet sich dahingehend, dass vorhandene Substanzmerkmale und Substanzschädigungen unbekannte Größen darstellen und durch das Georadarverfahren erkannt werden müssen. Die Art und Ausprägung ist dabei nicht bekannt und ist anhand der visuellen Charakteristika abzuschätzen. Dazu wurden die entsprechenden Radargramme visuell ausgewertet. Die quantitative Auswertung bezüglich der gemessenen Signallaufzeiten und Amplitudenausprägungen beschränkte sich aus Gründen der Praktikabilität auf grundsätzliche Veränderungen über längere Bereiche der Untersuchungsabschnitte, welche im Zuge der Vorauswertung als homogene Abschnitte definiert werden konnten (Kapitel 8.3.4).

Wie auf der Objektebene wurden Substanzmerkmale als Strukturen in der Straßensubstanz definiert, welche keine Schädigung oder Schichtgrenze darstellten. Dazu zählten insbesondere Aufbauwechsel zur Definition von homogenen Abschnitten, alte überbaute Bestandsstrukturen und Ronden zur Schichtdickenmessung im Zuge der Qualitätskontrolle und Bauüberwachung zum Zeitpunkt der Herstellung.

Die visuellen Charakteristika der Substanzschädigungen und Substanzmerkmale sind in Form von Radargrammausschnitten in einem weiteren Katalog in der Anlage D2 dargestellt. Der Katalog entspricht in seiner Struktur dem der Objektebene, wobei eine Unterscheidung in den Darstellungen ausschließlich in Bezug auf die Messfrequenz getroffen wurde. So wurden alle Messungen mit den Messfrequenzen 1.000 und 2.000 MHz durchgeführt. Die Scanrate als messtechnische Größe war in diesem Zusammenhang kein Unterscheidungskriterium, da jede Georadarmessung mit der maximal möglichen Scanrate und keine Wiederholungsmessungen bzw. kein Variantenvergleich durchgeführt wurde.

Die gewonnenen Georadar-Daten wurden entweder durch die Beprobung der Untersuchungsabschnitte oder durch die zur Verfügung gestellten Aufbaudaten kalibriert und durch eine direkte Ansprache der Straßensubstanz ergänzt. Dies implizierte insbesondere die Bereiche, in denen eine Schädigung der Substanz vermutet bzw. visuell im Radargramm interpretiert wurde. Vor diesem Hintergrund wurden verschiedene Substanzmerkmale und Substanzschädigungen festgestellt:

- Ausmagerungen und erhöhte Hohlraumgehalte in Asphaltsschichten, wodurch eine Zunahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit und Reduzierung der relativen Permittivität zu erwarten waren.
- Geschädigter Schichtenverbund zwischen Asphaltsschichten, wobei die Ursache, bedingt durch die mechanische Beanspruchung bei der Entnahme sowie die Ausspülung und Verwässerung der Schnittflächen durch Bohrschlamm, nicht festgestellt werden konnte.
- Einzelreflexionen durch metallische Ronden zur Schichtdickenmessung bei Kontrollprüfungen und Qualitätskontrollen im Asphalteinbau.
- Alte überbaute Bestandsstrukturen im Bereich der Bundesstraßen in Form von Mauerwerk oder Schlacken, zum Beispiel Aufmauerungen von alten Durchlässen und Kanälen.
- Risse im Asphaltoberbau und Fugen in Betontragschichten:
 - Schichtspezifische Einzelrisse in Asphaltsschichten.
 - Durchschlagende Risse in oberflächennahen Asphaltsschichten.
 - Schichtspezifische Reflexionsrisse in Betontragschichten.
 - Fugen in Betontragschichten, welche durch eine Doppelreflexion aufgrund der Fugenbreite von Einzelrissen abgegrenzt werden konnten.

drei Auswertemethoden wurden differenziert nach der Scanrate zu Messreihen zusammengefasst, welche jeweils durch die Messlinie der Objektebene, durch die Dimensionierung des Konstruktionsaufbaus (Belastungsklasse) sowie die Schichtgrenze charakterisiert sind. Es ergeben sich somit vier wesentliche Unterscheidungskriterien je deskriptivem Vergleich. Als Vergleichsgröße ist zusätzlich eine deskriptive Statistik über die Schichtgrenzen an den im 1m-Raster entnommenen Bohrkernen aufgeführt, welche den tatsächlichen Konstruktionsaufbau abbilden.

Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Bohrkern in einem Rastermaß von einem Meter vorliegen und dementsprechend eine geringere Grundgesamtheit gegenüber den Datensätzen der Georadarmessungen aufweisen. Im Zuge der Auswertung werden die Bohrkern dennoch als Soll-Vorgabe angesehen, da es sich um eine direkte Ansprache des Konstruktionsaufbaus handelt. Es gilt allerdings zu berücksichtigen, dass durchaus auch die Georadarmessungen, aufgrund der größeren Datenumfänge, den tatsächlichen Verlauf einzelner Schichtgrenzen besser als diese Bohrkern wiedergeben können. Insbesondere vor dem Hintergrund der deskriptiven Vergleichsbetrachtung zur statistischen Beschreibung der Messreihen durch einzelne statistische Parameter ist dieser Sachverhalt durch die Mehrzahl an Messwerten denkbar.

Die deskriptive Vergleichsbetrachtung umfasst den arithmetischen Mittelwert sowie die Standardabweichung als statistische Parameter. Für einen visuellen Vergleich sind diese Parameter zusätzlich in Form von Punktdiagrammen dargestellt. Dabei gilt es die verschiedenen Skalierungen der Ordinaten der Diagramme zu berücksichtigen.

Insgesamt lassen sich aus der deskriptiven Vergleichsbetrachtung die folgenden drei wesentlichen Schlussfolgerungen ziehen:

1. In Bezug auf die Wiedergabe der Schichtgrenzen durch das Georadar zeigt der Vergleich der Auswertemethoden, dass die Nutzung des Berechnungsalgorithmus „unkalibriert_automatic“ im arithmetischen Mittelwert die größten Abweichungen zu der an den Bohrkernen vorgegebenen tatsächlichen Tiefe der Schichtgrenzen aufweist. Die deskriptiven Statistiken zeigen ferner, dass die Streuung der Einzelwerte um den arithmetischen Mittelwert mit wenigen Ausnahmen ebenfalls am größten ist. Mit zunehmender Tiefe

8 Auswertung der Messdaten

8.1 Wiedergabe von Schichtgrenzen

8.1.1 Deskriptive Vergleichsbetrachtung der Auswertemethoden des Versuchsprogramms

In Kapitel 5.1.2 wurden drei Methoden dargelegt, anhand derer die Messdaten des Versuchsprogramms der Objektebene ausgewertet wurden. Im Zuge der Erstellung von deskriptiven Statistiken zur Beschreibung der Messdaten, welche in der Anlage J1 aufgeführt sind, wurden diese als „kalibriert_default_Value“ (Auswertemethode 3), „unkalibriert_automatic“ (Auswertemethode 2) und „unkalibriert_default_Value“ (Auswertemethode 1) definiert. Alle

nehmen die entsprechenden Standardabweichungen zu und weisen im Bereich der Asphalttragschicht und Asphaltgrenze, vor allem im Bereich der Belastungsklasse Bk100, zumeist eine um den Faktor zwei höhere Streuung gegenüber den beiden weiteren Auswertemethoden auf. Die Streuung der Einzelwerte ist infolge der Standardabweichungen in diesem Zusammenhang als erheblich einzuschätzen und im Vergleich aller drei Auswertemethoden als nachteilig zu bewerten.

2. Die Nutzung von default Values zeigt im vorliegenden Fall, dass die kalibrierten default Values nicht zwangsweise die tatsächliche Tiefe der Schichtgrenze besser als die unkalibrierten default Values wiedergeben. Dabei handelt es sich um eine hier zutreffende spezifische Schlussfolgerung, welche dem Erfahrungshintergrund der gewählten relativen Permittivität als messtechnische Eingangsgröße geschuldet ist und keinen allgemeingültigen Charakter beinhaltet. Da unkalibrierte default Values in der Regel auf Literaturangaben oder auf der Erfahrung des auswertenden Personals beruhen, handelt es sich um allgemeine Werte, welche nicht spezifisch auf einen Einzelfall zugeschnitten sind. Dadurch ist im Grundsatz eine bessere Wiedergabe der tatsächlichen Tiefe der Schichtgrenzen nicht zu erwarten. Aus Sicht der Verfasser ist eine Beprobung und damit Kalibrierung der Messdaten in jedem Fall zu präferieren und sollte Bestandteil des Processings und Post-Processings sein, sodass eine gezielte Anpassung der Georadar-Daten an die örtlichen Verhältnisse erfolgt.
3. Es gilt zu berücksichtigen, dass die Messlinie und der Fahrweg bei den durchgeführten Georadarmessungen mit den verschiedenen Scanraten nicht notwendigerweise deckungsgleich waren. Das Fahrverhalten kann in diesem Zusammenhang zu Abweichungen in der Messlinie und damit zu geringfügig abweichenden Messwerten führen.

Im Bereich der Asphaltdeckschicht gilt es darüber hinaus den Umstand zu berücksichtigen, dass durch die eingeschränkte Auflösung und Erkennbarkeit der Schichtgrenze im Radarogramm das Risiko von Pickfehlern besonders hoch ist. Diese können dann im Datenexport zu verfälschten Ergebnissen führen und dadurch eine abweichende Tiefe der Schichtgrenze suggerieren.

8.1.2 Analyse der Abweichungen zwischen Georadar und Bohrkern

In Anlehnung an die deskriptive Vergleichsbetrachtung in Kapitel 8.1.1 basierte die analytische Ermittlung der Abweichungen auf den zur Auswertung genutzten Methoden „kalibriert_default_Value“ (Auswertemethode 3), „unkalibriert_automatic“ (Auswertemethode 2) und „unkalibriert_default_Value“ (Auswertemethode 1). Dabei wurden diese Auswertemethoden grundsätzlich mit den auf der Versuchsstrecke entnommenen Bohrkernen (Fallunterscheidung 3 der Fallstudie der Beprobung der Objektebene) verglichen, wobei die Bohrkern die Bezugsgröße für den tatsächlichen Konstruktionsaufbau bildeten. Die Unterscheidungskriterien der deskriptiven Vergleichsbetrachtung zur Zusammenfassung der Georadar-Daten galten entsprechend.

Als Abweichung wurde in diesem Zusammenhang allgemein die Differenz der Tiefe der Schichtgrenze zwischen Bohrkern und Radarogramm angesehen, wobei die Straßenoberfläche der Versuchsstrecke als Bezugshorizont ($t = 0,0$ cm) definiert wurde. Die Vorzeichendefinition war wie folgt:

- Positive Abweichungen: Schichtgrenze im Radarogramm $>$ Schichtgrenze am Bohrkern.
- Negative Abweichungen: Schichtgrenze im Radarogramm $<$ Schichtgrenze am Bohrkern.

Die Analyse der Abweichungen umfasst zur grundlegenden Quantifizierung eine deskriptive Statistik für jede Messreihe, welche neben den in den Kapiteln 5.1.1 und 5.1.2 aufgeführten statistischen Parametern ergänzende Lage- und Streuparameter umfasst:

- Median \tilde{x} als mittlerer Wert aller Messwerte x_i der sortierten Messreihe für eine ungerade Anzahl an Messwerten nach (8.1) oder für eine gerade Anzahl an Messwerten nach (8.2).

$$\tilde{x} = \frac{x_{(n+1)}}{2} \quad (8.1)$$

$$\tilde{x} = \frac{\left(\frac{x_n}{2} + \frac{x_{n+1}}{2+1} \right)}{2} \quad (8.2)$$

Mit

n : Anzahl der Messwerte als Stationen einer Messlinie gemäß dem definierten Stationierungsraster auf der Objektebene

- Unteres Quartil $x_{0,25}$ (mindestens 25,0 % der sortierten Messwerte x_i sind kleiner als das Quartil). Es gelten die Berechnungen für eine ungerade Anzahl an Messwerten nach (8.3) oder für eine gerade Anzahl an Messwerten nach (8.4).

$$x_{0,25} = x_{\frac{(n+1)}{4}} \quad (8.3)$$

$$x_{0,25} = \frac{\left(x_{\frac{n}{4}} + x_{\frac{n}{4}+1} \right)}{2} \quad (8.4)$$

Mit

n: Anzahl der Messwerte als Stationen einer Messlinie gemäß dem definierten Stationierungsraster auf der Objektebene

- Oberes Quartil $x_{0,75}$ (mindestens 75,0 % der sortierten Messwerte x_i sind kleiner als das Quartil) für eine ungerade Anzahl an Messwerten nach (8.5) oder für eine gerade Anzahl an Messwerten nach (8.6).

$$x_{0,75} = x_{\frac{3(n+1)}{4}} \quad (8.5)$$

$$x_{0,75} = \frac{\left(x_{\frac{3n}{4}} + x_{\frac{3n}{4}+1} \right)}{2} \quad (8.6)$$

Mit

n: Anzahl der Messwerte als Stationen einer Messlinie gemäß dem definierten Stationierungsraster auf der Objektebene

Der Bereich der Belastungsklasse Bk3,2 umfasste auf der Objektebene insgesamt $n = 45$ Messwerte und damit eine ungerade Anzahl, sodass der Median nach (8.1) und das untere Quartil nach (8.3) ermittelt wurde. Der Bereich der Belastungsklasse Bk100 wies mit $n = 100$ eine gerade Zahl an Messwerten auf, sodass der Median nach (8.2) und das untere Quartil nach (8.4) ermittelt wurde. Entsprechend galten die Berechnungen für das obere Quartil nach (8.5) für den Bereich der Belastungsklasse Bk3,2 und nach (8.6) für den Bereich der Belastungsklasse Bk100.

Die deskriptiven Statistiken der Georadarmessungen dienen der allgemeinen Analyse und Beschreibung der Abweichungen in Bezug auf den tatsächlichen Konstruktionsaufbau. Zur Eruiierung der spezifischen Abweichungen von Einzelwerten wurden die berechneten Abweichungen ebenfalls mittels einer Häufigkeitsverteilung charakterisiert, um abzuschätzen, welche Abweichungen in welcher Häufigkeit bei der Interpretation von Schichtgrenzen im Radargramm auftraten. Die in diesem Zusammenhang erstellten Häufigkeitstabellen sind in der Anlage J2 aufgeführt und zeigen die absolute und relative Häufigkeit jeder Abweichung einzeln und kumuliert auf. In diesem Zusammenhang ist die größte positive Abweichung als Maximum und die größte negative Abweichung als Minimum angegeben.

Ergänzend sind die Abweichungen in der Anlage J3 für alle drei Auswertemethoden der Georadar-Daten in Linienprofilen längs der Messlinien der Objektebene visualisiert. Die Stationierung auf der Abszisse beinhaltet in diesem Zusammenhang den Skalierungsfaktor 2. Bild 29 zeigt beispielhaft die Abweichungen der Asphaltgrenze der Messlinie 1 unter Verwendung der Scanrate 10 Scans/m. Die Auswertemethoden 1 und 3 sind aufgrund der durch den Forschungsnehmer festgelegten Werte für die Ausbreitungsgeschwindigkeit und relativen Permittivität durch einen parallelen sowie vertikal versetzten Verlauf charakterisiert.

Anhand der Linienprofile sind bautechnisch markante Bereiche auf der Objektebene erkennbar, bei denen größere Abweichungen auftreten. Zu diesen Bereichen zählen insbesondere der Baulosanfang, das Baulosende sowie der Aufbauwechsel. Da die Signallaufzeit für alle drei verglichenen Auswertemethoden identisch war, resultieren diese Abweichungen vordringlich aus der Berechnungsgrundlage der drei Auswertemethoden und demnach aus der unterschiedlichen Angabe der Ausbreitungsgeschwindigkeit v bzw. relativen Permittivität ϵ_r .

Vor dem Hintergrund der Quantifizierung von Abweichungen ist der Fokus auf der Ermittlung von maximalen Abweichungen zu legen. Diese stellen den ungünstigsten Anwendungsfall dar und dienen im Zuge der Eruiierung der Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen zur Definition einer möglichen Genauigkeit des Verfahrens. Dabei sind sowohl die Rahmenbedingungen der Objektebene als auch die

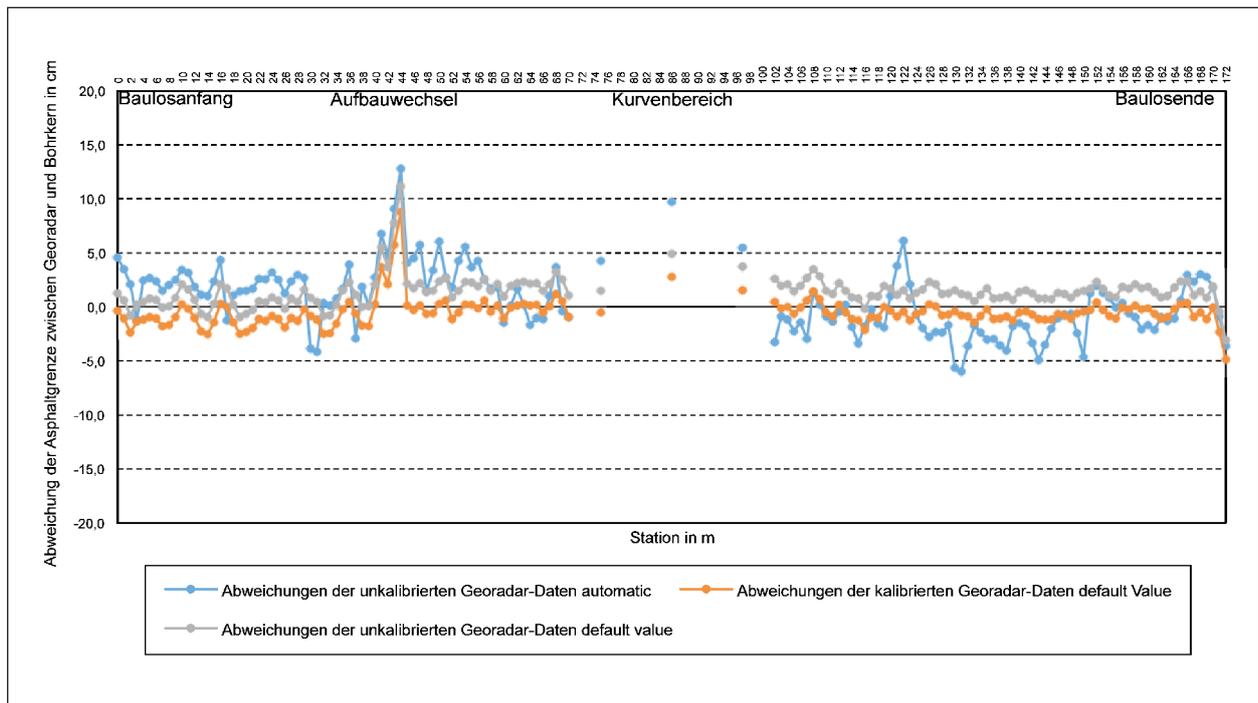


Bild 29: Linienprofil der Abweichungen der kalibrierten und unkalibrierten Georadar-Daten der Auswertemethoden vom Bohrkern bei der Wiedergabe der Asphaltgrenze der Messlinie 1 bei einer Scanrate von 10 Scans/m

genutzte Messtechnik des Versuchsprogramms zu berücksichtigen.

In den Tabellen 14 bis 17 werden die positiven und negativen Maxima der Abweichungen unter Einschluss der bautechnisch markanten Bereiche der Objektebene dargelegt. Dabei wird nach der Scanrate sowie den weiteren zuvor genannten Unterscheidungskriterien differenziert. Die Werte gelten ausschließlich in Kombination mit den in der Anlage J2 aufgeführten Häufigkeitsverteilungen sowie den Linienprofilen der Anlage F4.

Die Analyse der Abweichungen zeigt, dass insgesamt erhebliche Unterschiede in der Angabe der Tiefe auftreten. Es zeigt sich, dass unabhängig von der Scanrate die Spannweite der Abweichungen mit zunehmender Tiefe der Schichtgrenze in der Straßensubstanz ebenfalls zunimmt. Dadurch weist die Asphaltgrenze insgesamt die größten Abweichungen auf. Diese betragen bis zu -17,4 cm in der Messlinie 2 der Belastungsklasse Bk100 unter Nutzung der Scanrate 100 Scans/m und der Auswerte-

methode „unkalibriert_automatic“. Diese Abweichungen sind als erheblich einzustufen, wobei die Größe der Abweichungen in Bezug auf die Tiefe der Schichtgrenze und Dicke der angrenzenden Schichten im Konstruktionsaufbau derart groß sind, dass diese herstellungsbedingt nur durch einen bautechnisch markanten Bereich erklärbar sind.

Ferner zeigt sich innerhalb einzelner Schichtgrenzen kein konstantes Verhalten der Abweichungen in Bezug auf die Auswertemethode. Dadurch, dass die Signallaufzeit bei der Ermittlung der Tiefe der Schichtgrenze eine konstante Größe in der Auswertung darstellte, sind diese Unterschiede einerseits auf Abweichungen innerhalb des Pickens der Schichtgrenzen im Radargramm und andererseits auf die unterschiedlichen relativen Permittivitäten zurückzuführen, welche den einzelnen Auswertemethoden zugrunde liegen. In der Tendenz zeigt sich, dass die Auswertemethode „unkalibriert_automatic“ sowohl die größten positiven als auch die größten negativen Abweichungen aufweist.

Belastungsklasse Bk3,2 mit n = 45 Messwerten							
Schichtgrenze	Auswertemethode zur Ermittlung der Tiefe der Schichtgrenze	Abweichungen in der Messlinie 1 (ML1)		Abweichungen in der Messlinie 2 (ML2)		Abweichungen in der Messlinie 3 (ML3)	
		negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm
Asphaltdeckschicht – Asphaltbinderschicht	kalibriert_default_Value	-0,8	0,4	-0,8	0,6	-0,8	-0,1
	unkalibriert_automatic	-0,5	1,0	-0,6	1,3	-0,7	0,6
	unkalibriert_default_Value	-0,7	0,6	-0,8	0,6	-0,7	0,0
Asphaltbinderschicht – Asphalttragschicht	kalibriert_default_Value	-2,3	2,2	-2,0	0,4	-1,8	2,6
	unkalibriert_automatic	-1,3	1,8	-0,7	2,4	-1,9	4,3
	unkalibriert_default_Value	-2,1	2,3	-1,2	1,4	-1,3	3,4
Asphaltgrenze	kalibriert_default_Value	-2,6	8,8	-8,1	3,9	-4,8	1,5
	unkalibriert_automatic	-4,2	12,8	-5,9	6,5	-1,4	6,8
	unkalibriert_default_Value	-0,9	11,2	-7,5	5,3	-4,0	2,6
Belastungsklasse Bk100 mit n = 100 Messwerten							
Schichtgrenze	Auswertemethode zur Ermittlung der Tiefe der Schichtgrenze	Abweichungen in der Messlinie 1 (ML1)		Abweichungen in der Messlinie 2 (ML2)		Abweichungen in der Messlinie 3 (ML3)	
		negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm
Asphaltdeckschicht – Asphaltbinderschicht	kalibriert_default_Value	-0,7	1,9	-1,5	1,6	-2,0	0,4
	unkalibriert_automatic	-1,1	2,4	-1,3	2,3	-1,3	1,4
	unkalibriert_default_Value	-0,7	2,0	-1,3	1,9	-1,5	1,1
Asphaltbinderschicht – Asphalttragschicht	kalibriert_default_Value	-2,4	0,7	-2,4	2,4	-2,6	1,2
	unkalibriert_automatic	-2,7	2,4	-2,9	2,9	-3,2	2,6
	unkalibriert_default_Value	-1,9	1,5	-1,9	3,2	-1,4	2,7
Zweilagige Asphalttragschicht	kalibriert_default_Value	-3,2	1,5	-3,0	1,1	-2,7	1,5
	unkalibriert_automatic	-3,9	5,6	-4,5	3,9	-5,2	3,6
	unkalibriert_default_Value	-2,3	2,6	-2,2	2,0	-1,2	3,2
Asphaltgrenze	kalibriert_default_Value	-4,8	2,8	-15,3	0,3	-12,9	9,0
	unkalibriert_automatic	-6,0	9,7	-11,9	6,7	-11,8	8,6
	unkalibriert_default_Value	-3,1	5,0	-14,0	2,6	-11,4	11,4

Tab. 14: Maximale Abweichungen der Auswertemethoden des Georadars in Bezug auf den korrespondierenden Bohrkern in den Schichtgrenzen der Objektebene differenziert nach Messlinie bei einer Scanrate von 10 Scans/m

Belastungsklasse Bk3,2 mit n = 45 Messwerten							
Schichtgrenze	Auswertemethode zur Ermittlung der Tiefe der Schichtgrenze	Abweichungen in der Messlinie 1 (ML1)		Abweichungen in der Messlinie 2 (ML2)		Abweichungen in der Messlinie 3 (ML3)	
		negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm
Asphaltdeckschicht – Asphaltbinderschicht	kalibriert_default_Value	-0,3	1,4	-0,4	0,7	-0,2	0,6
	unkalibriert_automatic	-0,1	1,5	-0,2	1,2	0,0	1,0
	unkalibriert_default_Value	-0,2	1,5	-0,3	0,7	-0,2	0,7
Asphaltbinderschicht – Asphalttragschicht	kalibriert_default_Value	-2,0	1,3	-1,4	1,1	-2,0	0,4
	unkalibriert_automatic	-1,5	1,4	-1,0	2,0	-0,2	2,9
	unkalibriert_default_Value	-1,8	1,5	-1,2	1,3	-1,6	0,9
Asphaltgrenze	kalibriert_default_Value	-7,0	9,6	-7,5	4,6	-5,4	2,1
	unkalibriert_automatic	-6,9	12,4	-5,8	5,0	-3,1	7,0
	unkalibriert_default_Value	-6,4	11,0	-7,1	5,4	-5,0	2,9
Belastungsklasse Bk100 mit n = 100 Messwerten							
Schichtgrenze	Auswertemethode zur Ermittlung der Tiefe der Schichtgrenze	Abweichungen in der Messlinie 1 (ML1)		Abweichungen in der Messlinie 2 (ML2)		Abweichungen in der Messlinie 3 (ML3)	
		negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm
Asphaltdeckschicht – Asphaltbinderschicht	kalibriert_default_Value	-0,9	1,8	-0,7	1,3	-0,8	1,1
	unkalibriert_automatic	-1,2	2,1	-0,4	1,9	-0,9	2,4
	unkalibriert_default_Value	-0,8	2,0	-0,3	1,7	-0,2	1,8
Asphaltbinderschicht – Asphalttragschicht	kalibriert_default_Value	-1,9	2,8	-1,8	3,0	-2,7	1,4
	unkalibriert_automatic	-3,1	1,7	-4,0	2,4	-2,7	2,4
	unkalibriert_default_Value	-2,3	2,3	-1,8	3,1	-1,7	2,7
Zweilagige Asphalttragschicht	kalibriert_default_Value	-1,6	3,8	-1,8	2,2	-2,6	1,1
	unkalibriert_automatic	-8,4	4,1	-6,1	2,9	-4,6	4,9
	unkalibriert_default_Value	-2,4	2,8	-1,7	2,3	-1,2	2,5
Asphaltgrenze	kalibriert_default_Value	-4,0	4,0	-15,2	1,9	-12,6	10,0
	unkalibriert_automatic	-7,4	7,6	-13,9	5,4	-9,5	10,0
	unkalibriert_default_Value	-3,1	5,1	-14,6	3,4	-11,4	11,9

Tab. 15: Maximale Abweichungen der Auswertemethoden des Georadars in Bezug auf den korrespondierenden Bohrkern in den Schichtgrenzen der Objektebene differenziert nach Messlinie bei einer Scanrate von 20 Scans/m

Belastungsklasse Bk3,2 mit n = 45 Messwerten							
Schichtgrenze	Auswertemethode zur Ermittlung der Tiefe der Schichtgrenze	Abweichungen in der Messlinie 1 (ML1)		Abweichungen in der Messlinie 2 (ML2)		Abweichungen in der Messlinie 3 (ML3)	
		negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm
Asphaltdeckschicht – Asphaltbinderschicht	kalibriert_default_Value	-0,7	1,0	-0,6	0,4	-0,6	0,6
	unkalibriert_automatic	-0,5	1,1	-0,4	1,0	-0,8	0,8
	unkalibriert_default_Value	-0,6	1,1	-0,5	0,5	-0,5	0,7
Asphaltbinderschicht – Asphalttragschicht	kalibriert_default_Value	-1,9	1,0	-1,4	1,4	-3,7	0,6
	unkalibriert_automatic	-1,7	1,4	-0,5	1,9	-2,1	2,6
	unkalibriert_default_Value	-1,7	1,3	-1,2	1,6	-3,5	1,1
Asphaltgrenze	kalibriert_default_Value	-6,5	4,2	-7,7	4,2	-5,3	2,2
	unkalibriert_automatic	-4,5	3,4	-7,6	5,8	-3,2	6,4
	unkalibriert_default_Value	-5,9	5,4	-7,2	5,1	-4,8	3,0
Belastungsklasse Bk100 mit n = 100 Messwerten							
Schichtgrenze	Auswertemethode zur Ermittlung der Tiefe der Schichtgrenze	Abweichungen in der Messlinie 1 (ML1)		Abweichungen in der Messlinie 2 (ML2)		Abweichungen in der Messlinie 3 (ML3)	
		negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm
Asphaltdeckschicht - Asphaltbinderschicht	kalibriert_default_Value	-0,9	2,5	-1,0	2,4	-1,6	0,9
	unkalibriert_automatic	-1,5	2,0	-0,6	3,4	-1,8	1,5
	unkalibriert_default_Value	-0,8	2,8	-0,6	2,9	-1,0	1,5
Asphaltbinderschicht - Asphalttragschicht	kalibriert_default_Value	-1,8	4,3	-2,3	4,1	-3,4	1,1
	unkalibriert_automatic	-3,9	2,1	-3,0	4,1	-5,1	1,1
	unkalibriert_default_Value	-2,0	3,8	-2,2	4,3	-2,2	2,5
Zweilagige Asphalttragschicht	kalibriert_default_Value	-2,2	3,7	-2,8	2,2	-2,4	2,0
	unkalibriert_automatic	-6,5	3,2	-4,5	3,7	-8,2	0,9
	unkalibriert_default_Value	-2,8	2,8	-2,7	2,3	-1,2	3,3
Asphaltgrenze	kalibriert_default_Value	-3,4	3,9	-15,5	3,1	-12,9	10,1
	unkalibriert_automatic	-8,6	5,2	-13,8	6,8	-14,3	3,9
	unkalibriert_default_Value	-2,4	5,1	-14,9	4,4	-11,9	11,9

Tab. 16: Maximale Abweichungen der Auswertemethoden des Georadars in Bezug auf den korrespondierenden Bohrkern in den Schichtgrenzen der Objektebene differenziert nach Messlinie bei einer Scanrate von 50 Scans/m

Belastungsklasse Bk3,2 mit n = 45 Messwerten							
Schichtgrenze	Auswertemethode zur Ermittlung der Tiefe der Schichtgrenze	Abweichungen in der Messlinie 1 (ML1)		Abweichungen in der Messlinie 2 (ML2)		Abweichungen in der Messlinie 3 (ML3)	
		negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm
Asphaltdeckschicht - Asphaltbinderschicht	kalibriert_default_Value	-0,5	0,6	-0,5	0,5	-0,5	0,4
	unkalibriert_automatic	-0,3	0,9	-0,8	0,4	-0,7	0,3
	unkalibriert_default_Value	-0,5	0,7	-0,4	0,6	-0,4	0,5
Asphaltbinderschicht - Asphalttragschicht	kalibriert_default_Value	-1,9	1,0	-1,6	2,2	-1,7	1,0
	unkalibriert_automatic	-0,2	3,4	-2,2	0,6	-2,5	2,6
	unkalibriert_default_Value	-1,8	1,2	-1,4	2,5	-1,3	1,6
Asphaltgrenze	kalibriert_default_Value	-7,5	4,5	-7,7	4,8	-5,6	2,3
	unkalibriert_automatic	-4,7	7,8	-8,5	0,4	-5,2	5,1
	unkalibriert_default_Value	-6,9	5,7	-7,4	5,4	-5,1	3,0
Belastungsklasse Bk100 mit n = 100 Messwerten							
Schichtgrenze	Auswertemethode zur Ermittlung der Tiefe der Schichtgrenze	Abweichungen in der Messlinie 1 (ML1)		Abweichungen in der Messlinie 2 (ML2)		Abweichungen in der Messlinie 3 (ML3)	
		negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm	negativ in cm	positiv in cm
Asphaltdeckschicht - Asphaltbinderschicht	kalibriert_default_Value	-0,9	2,7	-0,8	2,4	-1,4	1,1
	unkalibriert_automatic	-1,1	3,6	-1,9	2,4	-1,9	1,7
	unkalibriert_default_Value	-0,8	2,9	-0,4	2,9	-0,8	1,8
Asphaltbinderschicht - Asphalttragschicht	kalibriert_default_Value	-1,2	4,4	-1,6	3,9	-2,6	1,4
	unkalibriert_automatic	-2,3	3,8	-6,0	0,6	-4,8	0,6
	unkalibriert_default_Value	-1,5	3,8	-1,6	3,9	-1,7	2,7
Zweilagige Asphalttragschicht	kalibriert_default_Value	-2,2	4,7	-2,2	2,3	-2,5	2,3
	unkalibriert_automatic	-3,2	5,6	-10,5	-1,3	-8,3	1,1
	unkalibriert_default_Value	-3,1	3,5	-2,2	2,3	-1,4	3,6
Asphaltgrenze	kalibriert_default_Value	-3,1	4,2	-15,7	2,9	-13,0	9,7
	unkalibriert_automatic	-4,5	7,4	-17,4	-2,4	-14,7	3,8
	unkalibriert_default_Value	-2,3	5,2	-14,9	4,5	-11,9	11,7

Tab. 17: Maximale Abweichungen der Auswertemethoden des Georadars in Bezug auf den korrespondierenden Bohrkern in den Schichtgrenzen der Objektebene differenziert nach Messlinie bei einer Scanrate von 100 Scans/m

Vor dem Hintergrund einer ergänzenden Profilbetrachtung der Messlinien wird ersichtlich, dass die dargelegten Maxima und Minima der Abweichungen mehrheitlich kleinräumig und in den bautechnisch markanten Bereichen der Objektebene auftreten. Zu diesen gehören der Baulosanfang, das Baulosende sowie der Aufbauwechsel an der Station 0+045. Diese Bereiche sind auf eine Diskrepanz zwischen der Einbaugeschwindigkeit und der Materialmenge des Asphaltmischgutes vor der Einbaubohle des Asphaltfertigers zurückzuführen [HUTSCHENREUTHER und WÖRNER, 2010]. Wie Bild 30 am Beispiel der an den entnommenen Bohrkerne ermittelten Asphaltgrenze zeigt, resultiert daraus eine lokal verringerte Dicke. Das vollständige Flächendiagramm der Versuchsstrecke ist in der Anlage F5 dargestellt.

Darüber hinaus sind vereinzelte Peaks entlang der Messlinien festzustellen, welche vordringlich der Auswertemethode „unkalibriert_automatic“ zuzuordnen sind. Gleichmaßen zeigen die Linienprofile, dass diese Auswertemethode insgesamt den unstetigsten Verlauf der Abweichungen in Längsrichtung aufweist und benachbarte Stationen erheblich voneinander abweichen können. In Bezug auf eine straßenbautechnische Interpretation sind die ermittelten Abweichungen insgesamt als erheblich einzustufen und vor dem Hintergrund der Herstellung der Versuchsstrecke nicht erklärbar. Dies belegt die Auswertung zum tatsächlichen Konstruktionsaufbau in Kapitel 5.1.1.

Anhand der Längsprofile der Messlinien wird ersichtlich, dass es sich bei den Abweichungen um lokale und vereinzelte Extrema handelt, welche alleinig keine Aussage hinsichtlich der Genauigkeit des Georadarverfahrens zulassen, sondern vielmehr zu einer datenseitigen Verzerrung führen. Dies belegen die Häufigkeitstabellen der Abweichungen in der Anlage J2. Die festgestellten maxi-

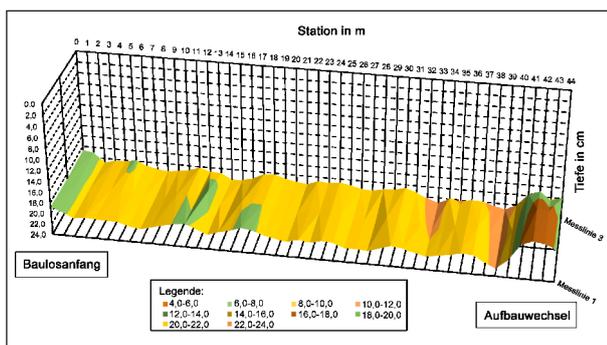


Bild 30: Flächendiagramm der Asphaltgrenze im Bereich der Belastungsklasse Bk3,2 der Versuchsstrecke

malen Abweichungen spiegeln somit insgesamt nicht die erwartbare Genauigkeit des Georadarverfahrens wider, welche aus den Messergebnissen der Objektebene ableitbar ist. Vor dem Hintergrund einer Aussage bezüglich der potenziellen Genauigkeit des Georadarverfahrens ist eine diesbezügliche Aussage auf Basis der Maximalwerte somit unzureichend. Daraus resultiert die Notwendigkeit, eine zusätzliche Betrachtung der Häufigkeiten der Abweichungen in die Auswertung einzubeziehen.

Auf Basis der Summenhäufigkeitstabellen der Anlage J4 wurden in diesem Zusammenhang empirische Anteilssätze ermittelt, welche die Abweichungen anhand von Abweichungsgrenzen absolut und relativ einschließen. Dazu wurden die Abweichungen in Klassen der Breite $\pm 0,5$ cm von 0,0 bis 10,0 cm sowie alle darüber hinausgehenden Abweichungen kumuliert als „ $> \pm 10,0$ cm“ zusammengefasst. Als Bemessungsgröße wurde schließlich das 95%-Perzentil als Anteilssatz der Summenhäufigkeit definiert. Die dadurch ausgeschlossenen 5,0 % der Messwerte stimmen näherungsweise mit der Anzahl an Messwerten überein, welche den bautechnisch markanten und datenseitig auszuschließenden Bereichen zuzuordnen sind.

Der Stichprobenumfang umfasste dazu im Bereich der Belastungsklasse Bk3,2 insgesamt 135 Messwerte und im Bereich der Belastungsklasse Bk100 insgesamt 300 Messwerte. Abweichend von diesen Stichprobenumfängen wies die Schichtgrenze innerhalb der zweilagigen Asphalttragschicht in der Scanrate 20 Scans/m ein um vier Messwerte geringeren Datenumfang auf. Dieser war auf eine abweichende Interpretation der Schichtgrenze im Radarogramm zurückzuführen, da die entsprechenden Stationen 0+045 und 0+046 nicht gepickt wurden. Dies stellt eine Messunsicherheit bzw. Abweichung dar und wird in Kapitel 9 näher erläutert.

Vor dem Hintergrund der vorgenannten Problematik hinsichtlich der Verzerrung der Genauigkeit des Georadarverfahrens durch bautechnisch markante Bereiche, wurden in der folgenden Auswertung nicht alle Abweichungen in die Analyse einbezogen. Vielmehr wurden die markanten Bereiche der Versuchsstrecke datenseitig von der Auswertung ausgeschlossen. Damit wurde der Empfehlung des Arbeitspapiers Nr. 443A der FGSV gefolgt.

Vor dem Hintergrund einer visuellen Auswertung der Radargramme (Bild 31) ließen sich diese Bereiche auf die folgenden Stationen eingrenzen:

- Baulosanfang: Stationen 0+000 – 0+002
- Aufbauwechsel: Stationen 0+042 – 0+048
- Baulosende je Messlinie:
 - Messlinie 1: Stationen 0+170 – 0+172
 - Messlinie 2: Stationen 0+169 – 0+171
 - Messlinie 3: Stationen 0+166 – 0+168

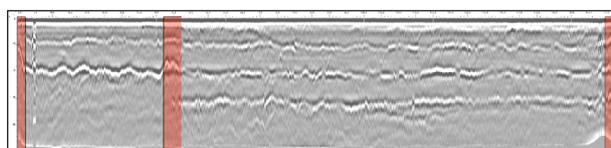


Bild 31: Visuelle Eingrenzung der bautechnisch markanten Bereiche der Versuchsstrecke

Insgesamt verringerte sich durch diesen datenseitigen Ausschluss die Anzahl der Messwerte je Messlinie um 13 auf insgesamt 132. Gleichmaßen veränderten sich die Summenbetrachtungen hinsichtlich der Abweichungsgrenzen. Diese sind ebenfalls in der Anlage J4 dargelegt und stellen eine Modifizierung der ursprünglichen Summenbetrachtungen dar. Die entsprechenden Abweichungsgrenzen, einerseits unter Berücksichtigung aller festgestellten Abweichungen und andererseits unter Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche, sind in Tabelle 18 dargestellt. Dabei wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit alle drei Messlinien je Auswertemethode und Scanrate zusammengefasst.

Es zeigt sich, dass die Abweichungen unter Verwendung einer höheren Scanrate scheinbar zunehmen. So weisen die berechneten Abweichungen in

Scanrate in Scans/m	Datenseitiger Ausschluss bautechnisch markanter Bereiche			Alle Abweichungen mit n = 435		
	kalibriert_ default_Value	unkalibriert_ automatic	unkalibriert_ default_Value	kalibriert_ default_Value	unkalibriert_ automatic	unkalibriert_ default_Value
Schichtgrenze Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht						
10	± 2,5	± 2,5	± 2,0	± 2,5	± 2,5	± 2,0
20	± 2,0	± 2,5	± 2,0	± 2,0	± 2,5	± 2,0
50	± 2,5	± 2,5	± 3,0	± 2,5	± 3,5	± 3,0
100	± 3,0	± 4,0	± 3,0	± 3,0	± 4,0	± 3,0
Schichtgrenze Asphaltbinder- und Asphalttragschicht						
10	± 3,0	± 3,5	± 3,5	± 3,0	± 4,5	± 3,5
20	± 3,0	± 4,5	± 3,5	± 3,0	± 4,5	± 3,5
50	± 4,5	± 5,5	± 4,5	± 4,5	± 5,5	± 4,5
100	± 4,5	± 6,5	± 4,0	± 4,5	± 6,5	± 4,0
Schichtgrenze innerhalb der zweilagigen Asphalttragschicht (nur Bk100)^{*)}						
10	± 3,5	± 6,0	± 3,5	± 3,5	± 6,0	± 3,5
20 ^{**)}	± 4,0	± 8,5	± 3,0	± 4,0	± 8,5	± 3,0
50	± 4,0	± 8,5	± 3,5	± 4,0	± 8,5	± 3,5
100	± 5,0	± 8,5	± 4,0	± 5,0	> ± 10,0	± 4,0
Asphaltgrenze^{***)}						
10	± 4,0	± 10,0	± 6,0	> ± 10,0	> ± 10,0	> ± 10,0
20	± 5,0	± 10,0	± 6,0	> ± 10,0	> ± 10,0	> ± 10,0
50	± 4,5	> ± 10,0	± 5,5	> ± 10,0	> ± 10,0	> ± 10,0
100	± 5,0	> ± 10,0	± 6,0	> ± 10,0	> ± 10,0	> ± 10,0

^{*)} Durch die Eingrenzung der Belastungsklasse liegt der Schichtgrenze eine abweichende Anzahl an Messwerten zugrunde. Unter Verwendung aller Abweichungen beträgt die Datengrundlage n = 300 Messwerte und bei datenseitigem Ausschluss n = 279.

^{**)} Die Datengrundlage beträgt, unter Verwendung aller Abweichungen aufgrund des abweichenden Pickens in den Messlinien 1 und 2, n = 296 Messwerte.

^{***)} Die Asphaltgrenze war an der Station 0+061 in der Messlinie 3 aufgrund einer lokalen Substanzschädigung (Schotternest) nicht prüfbar. Die Datengrundlage beträgt daher n = 395 Messwerte.

Tab. 18: Abweichungsgrenzen zwischen dem Georadarverfahren und den korrespondierenden Bohrkernen differenziert nach Scanrate und Auswertemethodik des Georadars in cm

den Scanraten 50 und 100 Scans/m in den Auswertemethoden „kalibriert_default_Value“ und „unkalibriert_default_Value“ tendenziell um bis zu $\pm 1,5$ cm höhere Werte auf. Die Auswertemethode „unkalibriert_automatic“ beinhaltet Abweichungen von bis zu $\pm 3,0$ cm (Schichtgrenze Asphaltbinder- und Asphalttragschicht).

Der Vergleich der Auswertemethoden des Georadars zeigt, dass die Nutzung des Berechnungsalgorithmus „unkalibriert_automatic“ die größten Abweichungen aufweist. Dies betrifft sowohl die Auswertung aller Messwerte als auch die Auswertung unter dem datenseitigen Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche. Dies stützt die Auswertungsergebnisse der unter Kapitel 8.1.1 dargelegten Vergleiche der deskriptiven Statistiken zu den einzelnen Auswertemethoden.

Insgesamt führte der datenseitige Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche der Versuchsstrecke dazu, dass der Großteil der als erheblich einzustufenden Abweichungen von der Betrachtung ausgeschlossen wurde. Das Auswertungsergebnis spiegelt dadurch die tatsächlichen Tiefen der Schichtgrenzen adäquater wider und belegt eine mögliche höhere Genauigkeit des Georadarverfahrens. Dies wird in erster Linie an denjenigen Schichtgrenzen deutlich, welche direkt von beispielsweise einem Aufbauwechsel betroffen sind. Dazu zählt vor allem die Asphaltgrenze, welche unter Verwendung aller vorhandenen Abweichungen unabhängig der Scanrate und der Auswertemethode des Georadars Abweichungen $> 10,0$ cm aufwies. Der datenseitige Ausschluss führte in diesem Zusammenhang vor allem bei der Verwendung von „default_Values“, also den festgesetzten Werten für die relative Permittivität, zu erheblich kleinen Abweichungsgrenzen, wobei die Kalibrierung der Messdaten einen erwarteten zusätzlichen positiven Effekt generiert. Je nach Scanrate liegen die Abweichungsgrenzen bei den unkalibrierten „default_Values“ näherungsweise bei $\pm 6,0$ cm und bei kalibrierten „default_Values“ zwischen 4,0 und 5,0 cm. Bei den weiteren Schichtgrenzen ist durch den datenseitigen Ausschluss nur in wenigen Fällen eine Veränderung der Abweichungsgrenze festzustellen. Dies belegt den geringen Einfluss der bautechnisch markanten Bereiche auf diese Schichtgrenzen, da die Veränderungen in der Schichtgrenze, zum Beispiel im Bereich eines Aufbauwechsels, gleitend und nicht gekantet bei der Herstellung ausgeführt werden. Dies belegen die in der Anlage F4 dargestellten Längsprofile der Messlinien der Objektebene vor dem Hintergrund

eines visuellen Vergleichs der Schichtgrenzen (Bild 25).

Die datenseitig reduzierten Abweichungen enthalten lokale Peaks, welche aus Sicht der Verfasser auf die Rahmenbedingungen der Versuchsstrecke zurückzuführen sind. Infolge der Vielzahl an Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen, welche die Versuchsstrecke als idealisierte Objektebene umfasst, kann nicht ausgeschlossen werden, dass lokale Veränderungen in den Signalen und weiterer messtechnischen Größen dazu geführt haben, dass die Tiefe der Schichtgrenzen durch das Georadar unzureichend wiedergegeben wurde. Dies ist vordringlich auf lokal veränderte Signallaufzeiten oder veränderte relative Permittivitäten (Kapitel 8.1.3) zurückzuführen. Wie die Auswertung der Absolutzahlen der Summenbetrachtungen zeigen, handelt es sich dabei um wenige Messwerte, welche zu den dargelegten Abweichungsgrenzen führen. Angesichts der Unverhältnismäßigkeit zwischen der Anzahl der Abweichungen und dem Einfluss auf die Aussage hinsichtlich der Genauigkeit des Verfahrens, spiegeln die dargelegten Abweichungsgrenzen aus Sicht der Verfasser daher nicht die abschließend mögliche Genauigkeit wider.

8.1.3 Studie zur Quantifizierung der relativen Permittivität ϵ_r von Asphalt

Die relative Permittivität ϵ_r ist der wesentliche Materialparameter, welcher Rückschlüsse aus den Messdaten des Georadars auf den Konstruktionsaufbau eines Untersuchungsabschnitts zulässt. Asphalt, als maßgebender Baustoff der Straßenbefestigung im vorliegenden Anwendungsfall, ist ein Verbundbaustoff, welcher aus einem Gesteinskörnungsgemisch, einem Bitumen als Bindemittel sowie etwaiger Zusätze und dem Hohl- bzw. Porenraum besteht. Jeder dieser Komponenten besitzt ein eigenes elektromagnetisches Eigenschaftsprofil sowie einen entsprechenden Volumenanteil in der Verbundkonstruktion. Durch die Vielzahl an möglichen Asphaltzusammensetzungen ist im Grundsatz keine pauschale Abschätzung hinsichtlich der relativen Permittivität von Asphalt möglich. Dadurch handelt es sich bei jeder Georadarmessung und detektierten Schicht um eine Einzelfallbetrachtung mit eigenem elektromagnetischem Eigenschaftsprofil.

Die Studie zur relativen Permittivität wurde im vorliegenden Anwendungsfall auf Basis der Daten der Objektebene durchgeführt. Zum einen war dies auf den weitestgehend kontrollierten und bekannten

Umgebungsparametern und zum anderen auf dem Wissen um den vorhandenen Konstruktionsaufbau begründet. Darüber hinaus bestand durch die flächenhafte Beprobung der Versuchsstrecke die Möglichkeit, die wahre Tiefe von Schichtgrenzen zu bestimmen und als Berechnungsgrundlage heranzuziehen. Dadurch konnte eine quantitative Aussage über die Verteilung der relativen Permittivität anhand einer größeren Stichprobe getroffen werden. Darüber hinaus bestand die Möglichkeit eines Vergleichs der drei Auswertemethoden zur Berechnung der Tiefe der Schichtgrenzen. Die Messdaten wurden dabei anhand der folgenden Unterscheidungskriterien differenziert ausgewertet:

- Scanrate in Scans/m
- Belastungsklasse als Maß für die Dimensionierung und den Konstruktionsaufbau
- Messlinie der Versuchsstrecke
- Auswertemethodik zur Berechnung der relativen Permittivität respektive der Tiefe der Schichtgrenzen
- Asphalterschicht im gebundenen Oberbau

Der ungebundene Oberbau war kein Gegenstand der Auswertung. Dies ist auf die unzureichenden

Angaben hinsichtlich der tatsächlichen Dicke der auf der Versuchsstrecke hergestellten FSS zurückzuführen, sodass keine Eingangsgröße für die Ermittlung einer tatsächlichen relativen Permittivität vorlag.

Die Studie zur Quantifizierung der relativen Permittivität umfasste folgende Auswertungen:

- Ermittlungen der tatsächlichen relativen Permittivität der vorhandenen Asphalterschichten auf Basis der in den Messlinien der Versuchsstrecke entnommenen Bohrkern unter Verwendung der Signallaufzeiten der in den Reflexionen verorteten Picks.
- Vergleich zwischen den an den Bohrkernen bestimmten und den mittels der drei Auswertemethoden berechneten relativen Permittivitäten der Georadarmessungen.

Die tatsächlichen relativen Permittivitäten der im Konstruktionsaufbau der Objektebene vorhandenen Schichten wurden anhand deskriptiver Statistiken charakterisiert. Die entsprechenden Auswertungsergebnisse sind der Anlage K zu entnehmen. In den Tabellen 19 und 20 sind die berechneten arithmetischen Mittelwerte dargestellt, um die tatsächliche relative Permittivität jeder Schicht im ge-

Scanrate in Scans/m	Asphaltdeckschicht			Asphaltbinderschicht			Asphalttragschicht obere Lage			Asphalttragschicht untere Lage		
	ML1 ^{*)}	ML2	ML3	ML1	ML2	ML3	ML1	ML2	ML3	ML1	ML2	ML3
10	5,47	5,21	4,81	6,32	6,37	6,60	Schichtgrenze war nur im Bereich der Belastungsklasse Bk100 existent			7,11	6,59	6,69
20	7,40	7,65	7,37	6,34	6,38	6,25				6,96	6,51	6,64
50	7,30	7,04	6,54	6,40	6,41	6,22				6,56	6,49	6,61
100	6,73	6,75	6,36	6,43	6,71	6,24				6,60	6,51	6,60

^{*)} ML = Messlinie der Objektebene

Tab. 19: Arithmetische Mittelwerte der relativen Permittivität ϵ_r der in den Messlinien der Objektebene entnommenen Bohrkern differenziert nach Schichtgrenze für den Bereich der Belastungsklasse Bk3,2

Scanrate in Scans/m	Asphaltdeckschicht			Asphaltbinderschicht			Asphalttragschicht obere Lage			Asphalttragschicht untere Lage		
	ML1 ^{*)}	ML2	ML3	ML1	ML2	ML3	ML1	ML2	ML3	ML1	ML2	ML3
10	8,59	8,04	7,36	6,49	6,41	6,65	6,49	6,39	6,52	6,91	6,64	7,03
20	8,65	9,34	8,45	6,56	6,57	6,59	6,48	6,45	6,53	6,85	6,62	7,03
50	9,12	9,21	7,91	6,77	6,80	6,72	6,46	6,35	6,52	6,91	6,66	6,96
100	10,00	8,47	7,72	6,71	6,76	6,63	6,46	6,43	6,52	6,96	6,76	6,95

^{*)} ML = Messlinie der Objektebene

Tab. 20: Arithmetische Mittelwerte der relativen Permittivität ϵ_r der in den Messlinien der Objektebene entnommenen Bohrkern differenziert nach Schichtgrenze für den Bereich der Belastungsklasse Bk100

bundenen Oberbau näherungsweise zu quantifizieren und potenzielle Zusammenhänge abzuleiten. Darüber hinaus fungiert der arithmetische Mittelwert als die Größe, welche im Zuge der Auswertung der Georadar-Daten eines Untersuchungsabschnitts für einen homogenen Abschnitt vergeben werden würde, da die Standardabweichungen der Einzelwerte auf diese Weise minimiert werden.

Die Asphalttschichten des gebundenen Oberbaus unterliegen der Prämisse, dass es sich um homogene und isotrope Körper handelt. Demnach müssen per Definition die relativen Permittivitäten der einzelnen Asphalttschichten im arithmetischen Mittelwert, unabhängig der Scanrate und unabhängig der Messlinie, identisch sein. Die dargelegten Messergebnisse zeigen jedoch, dass bei der Ermittlung der relativen Permittivität einer Asphalttschicht Streuungen auftraten. Diese traten bei jeder Asphalttschicht sowohl innerhalb einer Messlinie als auch innerhalb einer Scanrate auf. Die Abweichungen sind grundsätzlich der Tatsache geschuldet, dass das Versuchsprogramm des vorliegenden Anwendungsfalls ausschließlich Einzelmessungen vorsah, welche separat ausgewertet und interpretiert wurden und somit Abweichungen in den als Eingangsgröße verwendeten Signallaufzeiten beinhalten. Die bei den arithmetischen Mittelwerten ermittelten Abweichungen zeigen nun, dass es dadurch zu Schwankungen in den Messergebnissen kommen kann. Es zeigt sich, dass diese im Bereich der Asphaltdeckschicht am größten sind:

- Asphaltdeckschicht:
 - Belastungsklasse Bk3,2 zwischen 4,81 (Messlinie 3, Scanrate 10 Scans/m) und 7,65 (Messlinie 2, Scanrate 20 Scans/m)
 - Belastungsklasse Bk100 zwischen 7,36 (Messlinie 3, Scanrate 10 Scans/m) und 10,00 (Messlinie 1, Scanrate 100 Scans/m)
- Asphaltbinderschicht:
 - Belastungsklasse Bk3,2 zwischen 6,22 (Messlinie 3, Scanrate 50 Scans/m) und 6,71 (Messlinie 2, Scanrate 50 Scans/m)
 - Belastungsklasse Bk100 zwischen 6,41 (Messlinie 2, Scanrate 10 Scans/m) und 6,80 (Messlinie 2, Scanrate 50 Scans/m)
- Asphalttragschicht obere Lage:
 - Belastungsklasse Bk100 zwischen 6,35 (Messlinie 2, Scanrate 50 Scans/m) und 6,53 (Messlinie 3, Scanrate 20 Scans/m)

- Asphalttragschicht untere Lage:
 - Belastungsklasse Bk3,2 zwischen 6,49 (Messlinie 2, Scanrate 50 Scans/m) und 7,11 (Messlinie 1, Scanrate 10 Scans/m)
 - Belastungsklasse Bk100 zwischen 6,62 (Messlinie 2, Scanrate 20 Scans/m) und 7,03 (Messlinie 3, Scanraten 10 Scans/m und 20 Scans/m)

Die arithmetischen Mittelwerte im Bereich der Asphaltdeckschicht weisen gegenüber den weiteren, tieferliegenden Schichten erheblich größere Abweichungen auf, welche auf die beschränkte Auflösung und Erkennung der entsprechenden Schichtgrenze im Radargramm zurückzuführen sind. Die Schwankungen der arithmetischen Mittelwerte der weiteren Schichten liegen maximal bei 0,62 (Asphalttragschicht untere Lage in der Belastungsklasse Bk3,2) und sind somit geringer.

Die beschriebenen Schwankungen der arithmetischen Mittelwerte innerhalb der Messlinien sind auf das Picken der entsprechenden Schichtgrenzen zurückzuführen. Dieses unterliegt aufgrund der manuellen Auswertung und Interpretation dem menschlichen Einflussfaktor. Dadurch weisen die Messgrößen, welche den Picks direkt zugeordnet sind, ebenfalls Unsicherheiten auf. Dies betrifft in erster Linie die Signallaufzeit t in ns (Kapitel 9.2). Daraus resultiert eine Messunsicherheit im Berechnungsvorgang nach (3.17) hinsichtlich der Tiefe der Schichtgrenzen. Dadurch, dass die Schichtgrenzen in der hier dargelegten Auswertung allerdings eine Eingangsgröße darstellten, kehrt sich die Berechnung um und betrifft dadurch die Ausbreitungsgeschwindigkeit v respektive die relative Permittivität ϵ_r .

Die dargelegten arithmetischen Mittelwerte zeigen insgesamt, dass bei identischer Tiefe der Schichtgrenzen am Bohrkern durch das Picken dieser Schichtgrenzen im Radargramm Abweichungen in der Signallaufzeit auftreten können. Dies führt wiederum zu unterschiedlichen relativen Permittivitäten, welche sich durch die Auswertung der entsprechenden Einzelwerte visualisieren lassen. Die Anlage K zeigt in diesem Zusammenhang die Verteilung der relativen Permittivitäten der vorhandenen Asphalttschichten als Punktwolken auf, wobei eine Unterscheidung hinsichtlich der Messlinie, Scanrate und Belastungsklasse vorgenommen wurde.

Die optische Verteilung der relativen Permittivitäten zeigt darüber hinaus keine erheblichen Verände-

rungen des Wertebereichs in den vorhandenen Asphalt-schichten. So lässt sich der Wertebereich näherungsweise konstant mit 5,00 bis 9,00 charakterisieren, was eine Bestätigung der in der Literatur ausgewiesenen Werte darstellt. Im Bereich der Asphaltdeckschicht zeigen die Verteilungen in diesem Zusammenhang allerdings erhebliche Streuungen auf. Bei einer relativ gleichmäßigen Verteilung der auf der Abszisse aufgetragenen Tiefe der Schichtgrenze, streut die relative Permittivität zunehmend in den höheren Wertebereich mit Werten $> 10,00$. Ferner sind vielfach Extremwerte erkennbar, welche relativen Permittivitäten $> 15,00$ aufweisen (z. B. Belastungsklasse Bk100, Messlinie 2, Scanrate 20 Scans/m). Durch die näherungsweise konstante Tiefe der Schichtgrenze zwischen Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht sind diese erheblichen Abweichungen in der relativen Permittivität auf das abweichende Picken der Schichtgrenze im Radargramm zurückzuführen, welches wiederum auf die eingeschränkte Erkennbarkeit und Auflösung der Asphaltdeckschicht im Radargramm zurückzuführen ist.

Gleichermaßen konnten Streuungen in der unteren Lage der Asphalttragschicht festgestellt werden. In Anlehnung an die in Kapitel 8.1.2 festgestellten Abweichungen in der angrenzenden Asphaltgrenze resultieren diese aus einer Diskrepanz zwischen der Signallaufzeit und der Tiefe der Schichtgrenze. Diese Diskrepanz ist auf die variierenden Lage der Picks in der Schichtgrenze im Radargramm und damit aus Unsicherheiten in der Interpretation zurückzuführen. In Bezug auf die Stationierung der Extremwerte zeigt sich, dass die Abweichungen aus der Verortung der Picks in horizontaler Richtung resultieren und vordringlich den bautechnisch markanten Bereichen der Versuchsstrecke zuzuordnen sind (Anlage F5). Dies wurde bereits in Bezug auf die Abweichungen in der Tiefe der Schichtgrenzen

dargelegt und mittels Schichtenprofilen visualisiert (Anlage F4). Sowohl die Asphaltbinderschicht als auch die obere Lage der Asphalttragschicht zeigen in der Verteilung der relativen Permittivitäten näherungsweise gleichmäßige Punktwolken.

Vor dem Hintergrund der vorgenannten Extremwerte in der Asphaltdeckschicht und der unteren Lage der Asphalttragschicht empfahl sich, wie bereits bei der Analyse der Abweichungen in der Wiedergabe der Schichtgrenzen durch das Georadarverfahren, einen datenseitigen Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche der Versuchsstrecke. Wie bereits dargelegt zählten dazu insbesondere der Baubeginn, der Aufbauwechsel sowie das Bauende. Dieses Vorgehen führte zu neuen arithmetischen Mittelwerten in Bezug auf die Verteilung der tatsächlichen relativen Permittivitäten. Die modifizierten arithmetischen Mittelwerte sind in den Tabellen 21 und 22 dargelegt. Die dazugehörigen modifizierten deskriptiven Statistiken sind in der Anlage K aufgeführt. Die Anzahl der Messwerte betrug im Bereich der Belastungsklasse Bk3,2 $n = 39$ und im Bereich der Belastungsklasse Bk100 $n = 93$.

Es zeigt sich, dass durch den datenseitigen Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche der Versuchsstrecke insgesamt engere Wertebereiche für die arithmetischen Mittelwerte innerhalb der einzelnen Asphalt-schichten entstehen. Im Bereich der Asphaltdeckschicht weichen diese maximal um 2,57 (Messlinie 3, Scanrate 10 Scans/m und Messlinie 2, Scanrate 20 Scans/m) in der Belastungsklasse Bk3,2 und um 2,37 (Messlinie 3, Scanrate 10 Scans/m und Messlinie 1, Scanrate 100 Scans/m) in der Belastungsklasse Bk100 voneinander ab. In der Asphaltbinderschicht und der oberen Lage der Asphalttragschicht fallen die Abweichungen deutlich geringer aus und weisen ein vergleichbares Niveau zu den Ergebnissen der datenseitig nicht

Scanrate in Scans/m	Asphaltdeckschicht			Asphaltbinderschicht			Asphalttragschicht obere Lage			Asphalttragschicht untere Lage			
	ML1 ^{*)}	ML2	ML3	ML1	ML2	ML3	ML1	ML2	ML3	ML1	ML2	ML3	
10	5,19	4,95	4,86	6,24	6,40	6,41	Schichtgrenze war nur im Bereich der Belastungsklas- se Bk100 existent				6,71	6,74	6,80
20	7,04	7,43	7,41	6,33	6,40	6,30					6,65	6,62	6,73
50	7,17	6,90	6,60	6,42	6,36	6,31					6,65	6,62	6,71
100	6,45	6,58	6,48	6,44	6,55	6,31					6,73	6,66	6,72

^{*)} ML = Messlinie der Objektebene

Tab. 21: Datenseitig modifizierte arithmetische Mittelwerte der relativen Permittivität ϵ_r der Asphalt-schichten der in den Messlinien der Versuchsstrecke entnommenen Bohrkern für den Bereich der Belastungsklasse Bk3,2

Scanrate in Scans/m	Asphaltdeckschicht			Asphaltbinderschicht			Asphalttragschicht obere Lage			Asphalttragschicht untere Lage		
	ML1 ^{*)}	ML2	ML3	ML1	ML2	ML3	ML1	ML2	ML3	ML1	ML2	ML3
10	8,35	7,96	7,46	6,59	6,48	6,67	6,56	6,40	6,55	6,94	6,72	7,03
20	8,50	9,18	8,51	6,64	6,66	6,61	6,54	6,50	6,54	6,87	6,71	7,03
50	9,05	8,75	7,84	6,88	6,88	6,73	6,52	6,40	6,54	6,92	6,76	6,95
100	9,83	7,88	7,59	6,81	6,75	6,65	6,52	6,49	6,53	6,97	6,86	6,94

^{*)} ML = Messlinie der Objektebene

Tab. 22: Datenseitig modifizierte arithmetische Mittelwerte der relativen Permittivität ϵ_r der Asphaltsschichten der in den Messlinien der Versuchsstrecke entnommenen Bohrkern für den Bereich der Belastungsklasse Bk100

angepassten Messwerte auf. Eine datenseitige Optimierung der Messdaten erscheint für diese Asphaltsschichten deswegen nicht zwangsläufig notwendig.

Vor dem Hintergrund der in den deskriptiven Statistiken aufgeführten Spannweiten in der Anlage K zeigen sich im Bereich der Asphaltdeckschicht und in der Asphaltbinderschicht in den Messlinien 1 und 2, erhebliche Maxima mit relativen Permittivitäten größer 10,00. Diese sind nach Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche auf lokale Einzelpaks zurückzuführen, welche aus Sicht der Verfasser aus der Vielzahl an Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen der Versuchsstrecke resultieren und nicht die tatsächliche relative Permittivität der Asphaltsschichten widerspiegeln. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Berechnung von lokal hohen Permittivitäten ($> 10,00$) auf Diskrepanzen zwischen der Signallaufzeit und der entsprechenden Tiefe der Schichtgrenze sowie der unzureichenden Auflösung der Asphaltdeckschicht zurückzuführen sind. Vor dem Hintergrund der Berechnung der relativen Permittivität nach (3.8) wird diese Diskrepanz rechnerisch ausgeglichen.

Unabhängig dieser Extremwerte zeigen die Daten, dass es keine einheitliche Vorgabe hinsichtlich der relativen Permittivität von Asphalt gibt. Durch das manuelle Picken der Schichtgrenzen im Radarogramm entstehen zwangsläufig Unsicherheiten in Bezug auf die Signallaufzeit und daraus abgeleitet auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit und relative Permittivität. Näherungsweise lässt sich aus den arithmetischen Mittelwerten ausschließlich ein Kernbereich für die relative Permittivität zwischen 6,20 und 7,20 ableiten, wobei die Asphaltdeckschicht im Bereich der Belastungsklasse Bk100 erheblich abweicht.

In Bezug auf die vergleichende Betrachtung der arithmetischen Mittelwerte zwischen den drei vorgestellten Auswertemethoden und den tatsächlichen relativen Permittivitäten der entnommenen Bohrkern werden in der Anlage K Übersichtstabellen dargelegt. Alle weiteren statistischen Parameter der in diesem Zusammenhang durchgeführten deskriptiven Statistiken sind ebenfalls in der Anlage K aufgeführt. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass diese ausschließlich für die Auswertemethode „unkalibriert_automatic“ berechnet wurden. Bei den beiden weiteren Auswertemethoden „unkalibriert_default_Value“ und „kalibriert_default_Value“ entfallen die Berechnungen, da es sich um konstante Messwerte handelte, welche keinerlei Streuungen innerhalb eines als homogen definierten Auswertabschnittes aufweisen. Darüber hinaus umfasst die Anlage sowohl eine deskriptive Statistik aller Messwerte der Messlinien der Versuchsstrecke als auch eine modifizierte Statistik unter datenseitigem Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche. Der angeführte Vergleich dient der Erueierung des Übereinstimmungsgrades der relativen Permittivität, differenziert nach der Auswertemethodik, mit der tatsächlichen relativen Permittivität sowie der Bewertung der als „default Values“ angesetzten Werte im Zuge der Kalibrierung der Georadar-Daten. Es werden ausschließlich die datenseitig modifizierten arithmetischen Mittelwerte betrachtet. Die Vergleiche der relativen Permittivität unterliegen innerhalb einer Scanrate und Messlinie einer identischen Signallaufzeit. Dadurch resultieren die festgestellten Abweichungen ausschließlich aus dem unterschiedlichen Berechnungshintergrund der jeweiligen Auswertemethode.

Vor dem Hintergrund der möglichst exakten Wiedergabe des Konstruktionsaufbaus durch das Geora-

dar ist es das allgemeine Ziel, die relative Permittivität in der Berechnung derart zu wählen, dass diese mit der tatsächlichen relativen Permittivität der vorhandenen Schichten, welche im Praxisfall eine unbekannte Größe darstellt, übereinstimmt. Im vorliegenden Anwendungsfall bedeutet dies eine möglichst minimale Abweichung zwischen der relativen Permittivität am Bohrkern und der der Auswertemethoden des Georadarverfahrens.

In Bezug auf die Auswertemethoden gilt es die unterschiedlichen Berechnungsvorgänge sowie die abweichenden bautechnischen Hintergründe zu berücksichtigen. So ist die Auswertemethode „unkalibriert_default_value“ in diesem Zusammenhang ausschließlich als Näherungslösung anzusehen, welche die relative Permittivität als messtechnische Eingangsgröße nutzt, um während der Georadarmessung ein möglichst adäquates Bild der Straßensubstanz zu generieren. Gegebenenfalls ist durch eine Modifizierung dieser und weiterer messtechnischer Größen eine Optimierung durchzuführen.

Im Grundsatz orientiert sich der Mehrwert für das spätere Messergebnis am Erfahrungswert des auswertenden Personals, denn der gewählte Erfahrungswert spiegelt per Definition nicht die erwartete tatsächliche relative Permittivität der vorhandenen Schichten im Konstruktionsaufbau wider. Gleichermaßen wird der Wert für alle vorhandenen Schichten angesetzt, da es sich zu diesem Zeitpunkt um eine messtechnische Eingangsgröße handelt, welche im späteren Processing zu verändern ist. Daher ist der arithmetische Mittelwert dieser Auswertemethodik eine konstante Größe. Da es sich um einen Erfahrungswert handelt, wird die relative Permittivität ohne eine direkte Auswertung des Untersuchungsabschnitts angenommen. Der Übereinstimmungsgrad mit der tatsächlichen relativen Permittivität ist somit im Grundsatz als gering einzuschätzen, zumal die arithmetischen Mittelwerte der an den Bohrkernen ermittelten relativen Permittivitäten der unterschiedlichen Schichten keine konstanten Messergebnisse aufzeigen. Nichtsdestotrotz wurde insbesondere im Bereich der Asphaltbinderschicht und in den beiden Lagen der Asphalttragschicht die geringste Abweichung zur mittleren relativen Permittivität der Bohrkern festgestellt. Die Abweichungen betragen dabei in der Asphaltbinderschicht maximal 0,63 (Belastungsklasse Bk100, Messlinie 1, Scanrate 50 Scans/m), in der oberen Lage der Asphalttragschicht 0,30 (Belastungsklasse Bk100, Messlinie 3, Scanrate 10 Scans/m) und in der unteren

ren Lage der Asphalttragschicht 0,46 (Belastungsklasse Bk3,2, Messlinie 1, Scanrate 10 Scans/m).

Die Auswertemethode „unkalibriert_automatic“ berechnet die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Impulse ebenfalls ohne eine direkte Ansprache der Straßensubstanz. Diese wird anhand der Signalgeometrie, der Abstrahlcharakteristik, der Signallaufzeiten sowie der Einfall- und Brechungswinkel an den betroffenen Grenzflächen sowie unter Nutzung der spezifischen Amplitudenverhältnisse und Reflexionskoeffizienten in der jeweiligen Grenzfläche berechnet. Wie in der Analyse der Abweichungen in der Wiedergabe der Schichtgrenzen (Kapitel 8.1.2) dargelegt, ist diese Auswertemethode dadurch anfällig für lokale Inhomogenität in der Straßensubstanz und äußere Einflüsse, welche zu Veränderungen in den Amplitudenverhältnissen führen. Dadurch besteht die Möglichkeit der Entstehung lokaler Peaks, welche vor dem Hintergrund der Wiedergabe von Schichtgrenzen straßenbautechnisch nicht erklärbar waren. Dies spiegelte sich ebenfalls in den arithmetischen Mittelwerten der relativen Permittivität wider. So zeigten diese Extrema, welche Werte innerhalb einer Messlinie von allen weiteren Scanraten und Auswertemethoden, einschließlich der an den Bohrkernen ermittelten Werte, erheblich abweichen. Dieses Phänomen trat vor allem in der Messlinie 2 auf und zeigte mit zunehmender Scanrate folgende Extrema auf:

- 13,07 in der Asphaltdeckschicht
- 13,16 in der Asphaltbinderschicht
- 12,88 in der oberen Lage der Asphalttragschicht
- 13,47 in der unteren Lage der Asphalttragschicht

Sämtliche Extrema waren der Belastungsklasse Bk100 sowie der Messlinie 2 bei einer Scanrate von 100 Scans/m zuzuordnen. Gleichermaßen zeigte die Auswertemethode in den Messlinien 1 und 3 in Einzelfällen die geringste mittlere Abweichung in der relativen Permittivität. Die Abweichungen betragen in der Asphaltdeckschicht maximal 1,75 (Belastungsklasse Bk100, Messlinie 1, Scanrate 10 Scans/m), in der Asphaltbinderschicht 0,21 (Belastungsklasse Bk100, Messlinie 1, Scanrate 100 Scans/m), in der oberen Lage der Asphalttragschicht 0,17 (Belastungsklasse Bk100, Messlinie 1, Scanrate 10 Scans/m) und in der unteren Lage der Asphalttragschicht 0,39 (Belastungsklasse Bk100, Messlinie 2, Scanrate 10 Scans/m).

Die dritte Auswertemethode „kalibriert_default_Value“ unterliegt der direkten Ansprache der Substanz durch eine zwingend notwendige Beprobung. Anhand dieser wird für jede Schicht im Konstruktionsaufbau innerhalb eines als homogen definierten Abschnitts eine relative Permittivität ermittelt und als Grundlage für die Berechnung der Tiefe der vorhandenen Schichtgrenzen angesetzt. Im Hinblick auf den bautechnischen Hintergrund ist dabei der höchste Übereinstimmungsgrad mit der tatsächlichen relativen Permittivität des jeweiligen Untersuchungsabschnitts zu erwarten. Die Messergebnisse zeigen im vorliegenden Anwendungsfall diesbezüglich im Bereich der Asphaltdeckschicht und der unteren Lage der Asphalttragschicht vielfach die geringsten Abweichungen zwischen den arithmetischen Mittelwerten auf.

Die Auswertung der arithmetischen Mittelwerte der drei Auswertemethoden des Georadarverfahrens in Bezug auf die Quantifizierung der relativen Permittivität zeigt auf Basis der vorgenannten Erläuterungen und der tabellarischen Vergleiche der Anlage K insgesamt ein sehr diffiziles Bild, welches keine eindeutigen Schlüsse bzw. lediglich Tendenzen in der Präferenz der Wahl der Auswertemethode zulässt.

8.2 Systematische Darstellungen von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen

8.2.1 Visuell feststellbare Charakteristika im Radargramm

Eine denkbare Systematisierung der Charakteristika und Darstellungen von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen in Radargrammen ist eine allgemeine visuelle Mustererkennung. Anhand spezifischer Muster besteht hierbei die Möglichkeit, einen Algorithmus zu entwickeln, welcher die Form einer Substanzschädigung oder eines Substanzmerkmals abbildet und allgemeine Erkennungsmerkmale darlegt. Bei einer ausreichenden Datengrundlage zu einer spezifischen Schädigung oder einem spezifischen Merkmal ist dadurch die Option der Erarbeitung einer quantitativen Systematik gegeben, welche beispielsweise auch elektromagnetischen Eigenschaften einschließen könnte. Dabei sind ergänzende systematische Untersuchungen in Bezug auf die Amplitudencharakteristik der Grenzflächen, Veränderungen in der Signallaufzeit und die Größe der relativen Permittivität der durch die Schädigung betroffenen Schichten, denkbar. Eine

Problematik besteht in diesem Zusammenhang dahingehend, dass eine konkrete Zuordnung der visuellen Charakteristika zu einer Substanzschädigung oder einem Substanzmerkmal allein auf Basis von Georadar-Daten nur eingeschränkt möglich ist. Die Zuordnung wird insofern eingeschränkt, da verschiedene Substanzschädigungen durchaus gleichartige Charakteristika, zum Beispiel Diffraktionshyperlern, in den Georadar-Daten generieren.

Bei der Mustererkennung ist grundsätzlich zwischen längs und quer zur Messrichtung verlaufenden Schädigungen bzw. Merkmalen zu unterscheiden, da diese unterschiedliche Charakteristika im Radargramm generieren. So stellen sich in Messrichtung verlaufende Schädigungen oder Merkmale als fortlaufende horizontale Reflexionen und dementsprechend als Linien dar, welche durch die Größe und Abfolge der Amplituden in der Grenzfläche mit einer bestimmten Farbcodierung belegt sind. Neben der Lage ist gleichermaßen die Ausprägung der Schädigung respektive der Struktur zu berücksichtigen, inwieweit eine Reflexion oder eine Diffraktion entsteht.

Sofern sich die Substanzschädigung direkt auf eine Schichtgrenze bezieht, ist eine Unterscheidung zwischen der geschädigten und nicht geschädigten Schichtgrenze nur möglich, wenn Veränderungen im elektromagnetischen Eigenschaftsprofil eine visuelle Abgrenzung zulassen. Hierbei ist eine Veränderung der Phasenfolge oder Ausprägung der Amplituden notwendig. Wie in Kapitel 3.1 dargelegt, hängt die Polarisation der Halbwellen von dem dielektrischen Kontrast der ober- und unterhalb der Schichtgrenze befindlichen Schichten ab. Durch eine lokale Phasenumkehr oder Phasenverschiebung verändert sich die Polarisation der Halbwellen. Sind darüber hinaus Veränderungen in der Ausprägung der Amplitude erkennbar, kann der entsprechende Bereich im Radargramm visuell abgegrenzt werden (Bild 32).



Bild 32: Visuelle Abgrenzung einer geschädigten Schichtgrenze im Radargramm zwischen den Stationen 0+015 und 0+028 in der Messlinie 2 (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 50 Scans/m)

Grenzflächen, welche quer zur Messrichtung des Georadars verlaufen, werden im Radargramm in Form von Diffraktionshyperbeln dargestellt, sofern deren Ausprägung und Geometrie näherungsweise der Wellenlänge der elektromagnetischen Impulse entspricht oder entsprechend kleiner ist [KILIAN UND WE-BER, 2003]. Dies ist die charakteristische Darstellung für lokale Objekte oder Substanzmerkmale sowie Substanzschädigungen (Bild 33). Das Erkennen von Diffraktionshyperbeln wird dabei im Radargramm durch eine ausreichende Datendichte als Resultat einer höheren Scanrate erleichtert. Dies kann einerseits durch die Wahl einer entsprechenden Scanrate als messtechnische Eingangsgröße oder andererseits durch die nachträgliche horizontale Skalierung der Georadar-Daten erreicht werden. Dabei ist eine zu große Verzerrung des Radargramms zu vermeiden, da es sich ausschließlich um eine Veränderung der Darstellungsparameter bei gleicher Datendichte handelt. Im Rahmen der Datenauswertung (Kapitel 5.2 und 7.2) konnte festgestellt werden, dass die Wiedergabe von Substanzschädigungen mit Scanraten von mindestens 20 Scans/m sachdienlich sind, um eine gute Erkennbarkeit der Diffraktionshyperbeln im Radargramm zu erzielen.

Vor dem Hintergrund der Variation der Messfrequenz und der gewählten Art und Ausprägung der auf der Objektebene untersuchten Substanzmerkmale und Substanzschädigungen zeigen die Auswertungen, dass Frequenzen von $f > 1.000$ MHz zur Detektion von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen genutzt werden konnten. Hierbei ist die Abhängigkeit des Effektes der Diffraktion von der Wellenlänge und der Art und Ausprägung der Substanzschädigung bzw. des Substanzmerkmals zu beachten.

Die Wahl einer kleineren Messfrequenz führt zudem zu einer größeren Detektionstiefe und damit einem verringerten vertikalen Auflösungsvermögen (Bild

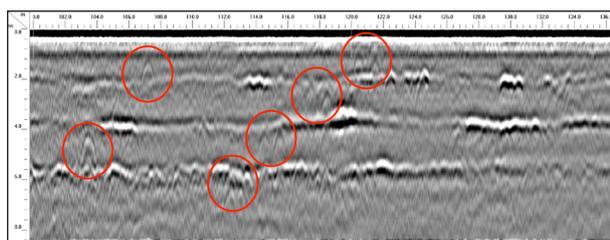


Bild 33: Diffraktionshyperbeln im Radargramm von lokalen Hohlräumen (links) und schichtspezifischen Rissen der Rissbreiten 3,0 mm und 10,0 mm (rechts) in der Messlinie 2 der Objektebene (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate 50 = Scans/m)

22). Die Auflösung der Schichten des Asphaltbaus wird dadurch erschwert und im Fall von Schichtdicken, welche kleiner als der Mindestabstand zweier Reflektoren (hier: Schichtgrenzen) nach (3.15) sind, verhindert.

Auf Netzebene wurden bei einzelnen Untersuchungsabschnitten vergleichbare Diffraktionshyperbeln festgestellt, welche durch querverlaufende Einzelrisse (Bild 34) und in Form von nachträglich hergestellten äquidistanten Fugen (Bild 35) im Bereich der vorhandenen Betontragschicht hervorgehoben wurden.

Im Bereich der tieferliegenden Schichten konnten ferner alte Bestandsstrukturen wie zum Beispiel alte Tragschichten aus Beton, gemauerte Kanäle oder andere künstliche Gesteinsschichten festgestellt werden. Diese traten ausschließlich im Bereich der Bundesstraßen auf und konnten in den entsprechenden Radargrammen durch lokale Diffraktionshyperbeln und Veränderungen von Reflexionstiefen über längere Bereiche (Bild 36) festgestellt und interpretiert werden.

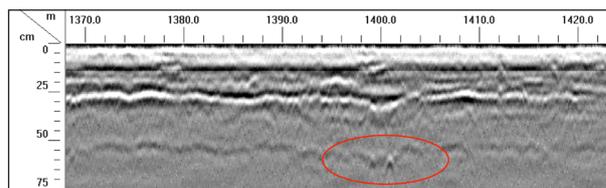


Bild 34: Einzelreflexionen von Querrissen im Bereich der Betontragschicht ($f = 1.000$ MHz, Scanrate = 15 Scans/m) (BAB 2)

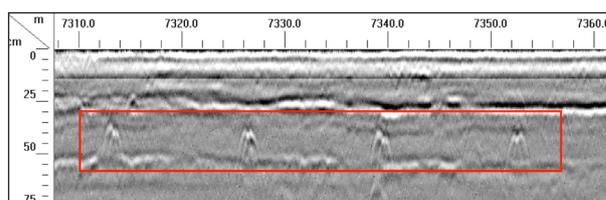


Bild 35: Doppelreflexion von äquidistanten Fugen in Bereich der Betontragschicht ($f = 1.000$ MHz, Scanrate = 15 Scans/m) (BAB 2)

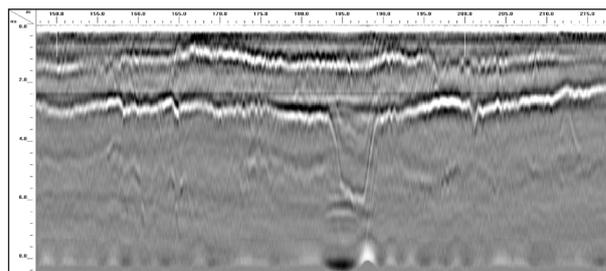


Bild 36: Visuelle Charakteristik von lokalen Bestandsstrukturen (aufgemauerter Durchlass) auf der B79 durch lokale Veränderungen der Reflexionstiefe (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 20 Scans/m)

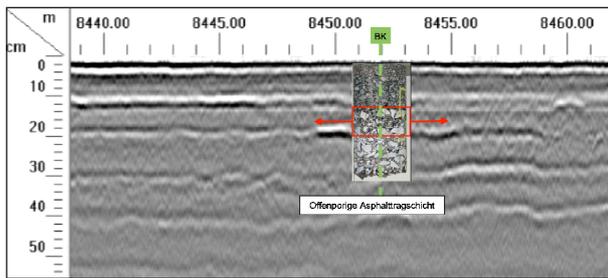


Bild 37: Visuelle Charakteristik von offenporigen Schichten im Asphaltbau auf der BAB 61 (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 20 Scans/m)

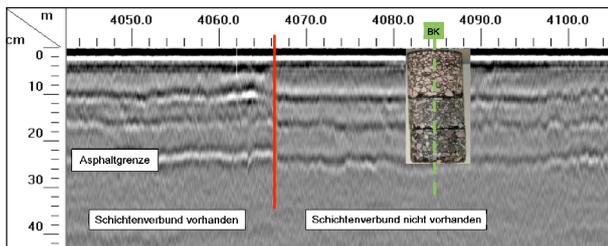


Bild 38: Visuelle Charakteristik von Bereichen mit und ohne Schichtenverbund im Asphaltbau auf der BAB 38 (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 10 Scans/m)

Darüber hinaus konnten erhöhte Hohlraumgehalte, durch beispielsweise Ausmagerungen in Asphaltbinder- oder Asphalttragschichten festgestellt werden. Diese zeigten sich flächig und über längere Bereiche innerhalb des Untersuchungsabschnitts. Die Erkennbarkeit entsprechender Bereiche ist im Radargramm hierbei ausschließlich in Kombination mit einem Bohrkern gegeben, da keine eindeutigen visuellen Charakteristika eine Abgrenzung von nicht betroffenen Bereichen zulassen (Bild 37).

Gleichermaßen konnten Unterscheidungen zwischen vorhandenem und nicht vorhandenem Schichtenverbund vorgenommen werden, wobei diese immer in Kombination mit einem Bohrkern und direkten Ansprache des Konstruktionsaufbaus zu sehen waren. So zeigten entsprechende Bereiche mit nicht vorhandenem Schichtenverbund ein abweichendes Wellenmuster in den betroffenen Schichtgrenzen (Bild 38).

Neben Substanzschädigungen wurden auch Substanzmerkmale quer zu Messrichtung erfasst. Zu diesen zählten insbesondere metallische Ronden, welche zur Schichtdickenmessung im Zuge der Qualitätssicherung genutzt werden (Bild 39) und Aufbau- und Abschnittswchsel zwischen homogen definierten Abschnitten. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde auf der Objektebene ein entspre-

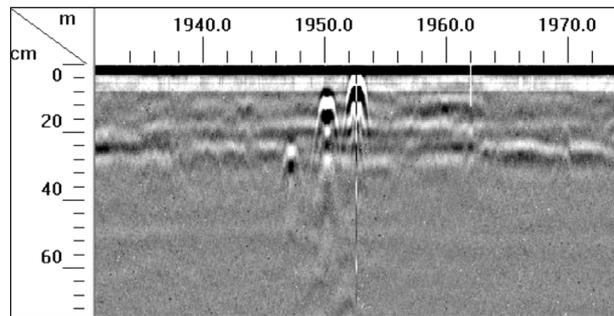


Bild 39: Visuelle Charakteristik von Ronden zur Schichtdickemessung auf der BAB 38 (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 10 Scans/m)

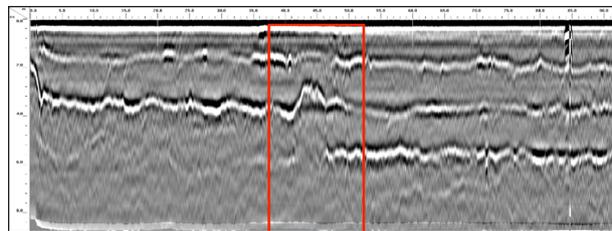


Bild 40: Visuelle Charakteristik des Aufbauwechsels in der Messlinie 3 der Objektebene (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 20 Scans/m)

chender Aufbau- und Abschnittswchsel integriert, welcher sich durch die Veränderung der Tiefe der Schichtgrenzen im Radargramm deutlich zeigte (Bild 40).

Vergleichbare Aufbauwechsel wurden auf den Untersuchungsabschnitten der Netzebene festgestellt, wobei diese entweder mit der Änderung der Schichtenfolge oder mit einer Änderung der stofflichen Zusammensetzung einhergingen (Bild 41 und Bild 42). Letzteres betraf im Wesentlichen den Bereich der gebundenen Tragschichten, wobei ein Wechsel von einer Asphalttragschicht zu einer bewehrten Betontragschicht beispielhaft dargestellt ist. Dies zeigt gleichzeitig die Möglichkeit der Detektion der Betonbewehrung sowie die Abschätzung der Höhe der Bewehrungslage auf.

Die visuelle Auswertung legt nahe, dass infolge des vertikalen Auflösungsvermögens, eine Verwendung von Messfrequenzen $f = 1.000$ MHz für die Detektion von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen im gebundenen Oberbau zielführend sind. Handelt es sich um lokale Schädigungen, wie einzelne Hohlräume oder Risse mit geringen Durchmessern bzw. Rissbreiten, ist eine Messfrequenz von 2.000 MHz empfehlenswert.

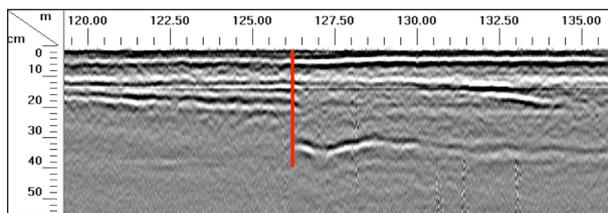


Bild 41: Visuelle Charakteristik eines Aufbauwechsels im Radargramm der Bundesstraße B10 in Rheinland-Pfalz (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 25 Scans/m)

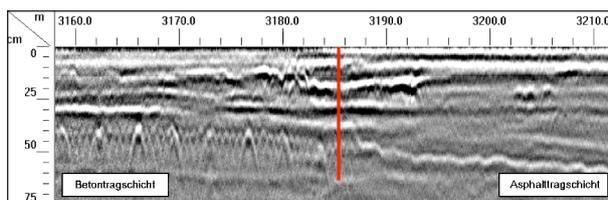


Bild 42: Visuelle Charakteristik eines Aufbauwechsels mit gleichzeitigem Materialwechsel im Radargramm der Bundesautobahn BAB 2 (Display Gain = 30, $f = 1.000$ MHz, Scanrate = 15 Scans/m)

8.2.2 Wellenmuster im O-Scope

Die Analyse von Wellenmustern im O-Scope dient der Erkennung und Eingrenzung von flächigen Substanzmerkmalen oder Substanzschädigungen, welche vordringlich in Messrichtung verlaufen. Diese fallen mit der eigentlichen Schichtgrenze zusammen und sind daher visuell nur durch eine abweichende Darstellung im Radargramm einzugrenzen. Diese kann anhand der Amplitudenausprägung und des Amplitudenverlaufs der Reflexion der betroffenen Schichtgrenze erfolgen. Bei der Abgrenzung kann es sich dabei um eine abweichende Polarisation und geänderte Abfolge der Halbwellen, eine Phasenverschiebung oder eine Phasenumkehr sowie eine unterschiedliche Ausprägung der Amplituden und Amplitudenmaxima handeln.

Durch das abweichende Wellenmuster entstehen unterschiedliche Farbcodierungen im Radargramm, welche interpretiert werden können, um Bereiche, zum Beispiel mit unzureichendem Schichtenverbund, abzugrenzen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass keine direkte Korrelation und Ansprache möglich ist, sondern ausschließlich anhand der Veränderungen in den Amplituden auf Veränderungen in der Grenzfläche geschlossen wird. Im vorliegenden Anwendungsfall wurden diesbezüglich auf der Objektebene zwei unterschiedliche Methoden gewählt, um den Verbund zweier benachbarter As-

phaltschichten zu beeinträchtigen. Einerseits wurden Teilflächen abgesandet und andererseits wurde ein geschlossener Wasserfilm aufgebracht. Als Datengrundlage wurden die in den Messlinien der Versuchsstrecke entnommenen Bohrkerne im 1m-Raster genutzt. Sofern der Bohrkern in mehreren Teilen aus dem Bohrloch entnommen werden musste, wurde der Schichtenverbund als unzureichend definiert. Somit liegt der Auswertung eine rein visuelle Abschätzung zugrunde. Es erfolgte kein Nachweis in Bezug auf die Feststellung der aufnehmbaren Scherkraft von 12,0 bzw. 15,0 kN gemäß den ZTV Asphalt-StB.

Auf Basis der O-Scopes innerhalb der genannten Teilflächen wurde eine Untersuchung hinsichtlich einer systematischen Charakteristik von nicht vorhandenem Schichtenverbund durchgeführt. Die Bilder 43 bis 48 verdeutlichen anhand mehrerer Beispiele typische Amplitudenverläufe der Wellenmuster von Grenzflächen auf der Objektebene. Dazu wurden ausschließlich Scans der Messlinie 1 gewählt. Die Amplituden wurden in diesem Zusammenhang in Data Units angegeben.

Die Bilder 43 bis 45 umfassen als Grenzflächen die Schichtgrenze zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht sowie die Schichtgrenze innerhalb der zweilagigen Asphalttragschicht. Es wurden somit ausschließlich Stationen aus dem Bereich der Belastungsklasse Bk100 gewählt. Die Scans sind in vertikaler Richtung auf die Samples zwischen 170 und 340 beschränkt, da die weiteren Samples im Bereich der Oberfläche der Versuchsstrecke sowie der Asphaltgrenze unerheblich für die Zielsetzung der Analyse sind.

Die Bilder 46 bis 48 umfassen neben den beiden vorgenannten Schichtgrenzen auch die Asphaltgrenze, um das Wellenmuster eines Wechsels der stofflichen Zusammensetzung an der Grenzfläche mit einzubeziehen.

Mit Ausnahme von Bild 48 umfassen alle Bilder zwei O-Scopes, um visuelle Vergleiche zu ermöglichen. Dabei werden entweder der zeitliche Verlauf der Scans an sich verdeutlicht oder aber Gegensätze und damit nicht eindeutige Verläufe und die entsprechende Problematik in der Zuordnung zu dem straßenbautechnischen Hintergrund der Schichtgrenze dargestellt.

Bild 43 zeigt einen Verlauf der Amplituden bei vorhandenem Schichtenverbund in den Stationen 0+054 und 0+055 der Messlinie 1. Dieser setzt sich

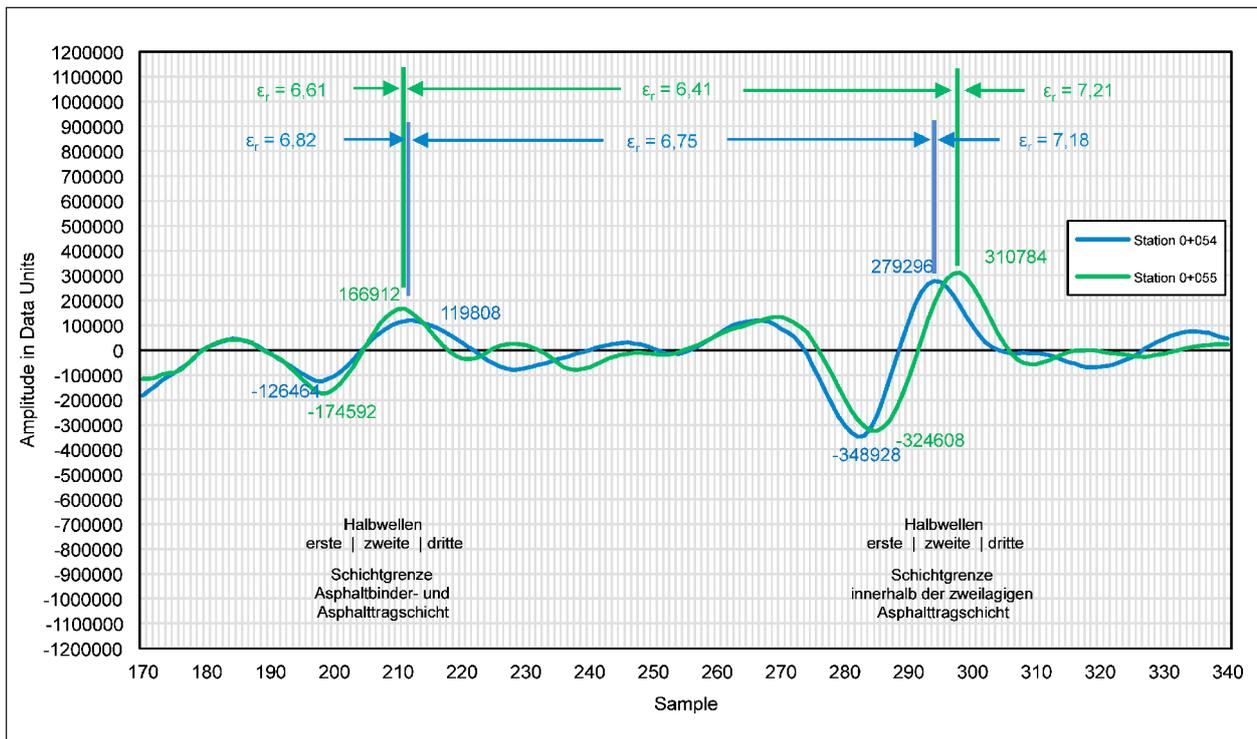


Bild 43: Wellenmuster von Schichtgrenzen mit Schichtenverbund im O-Scope in der Messlinie 1 an den Stationen 0+054 und 0+055

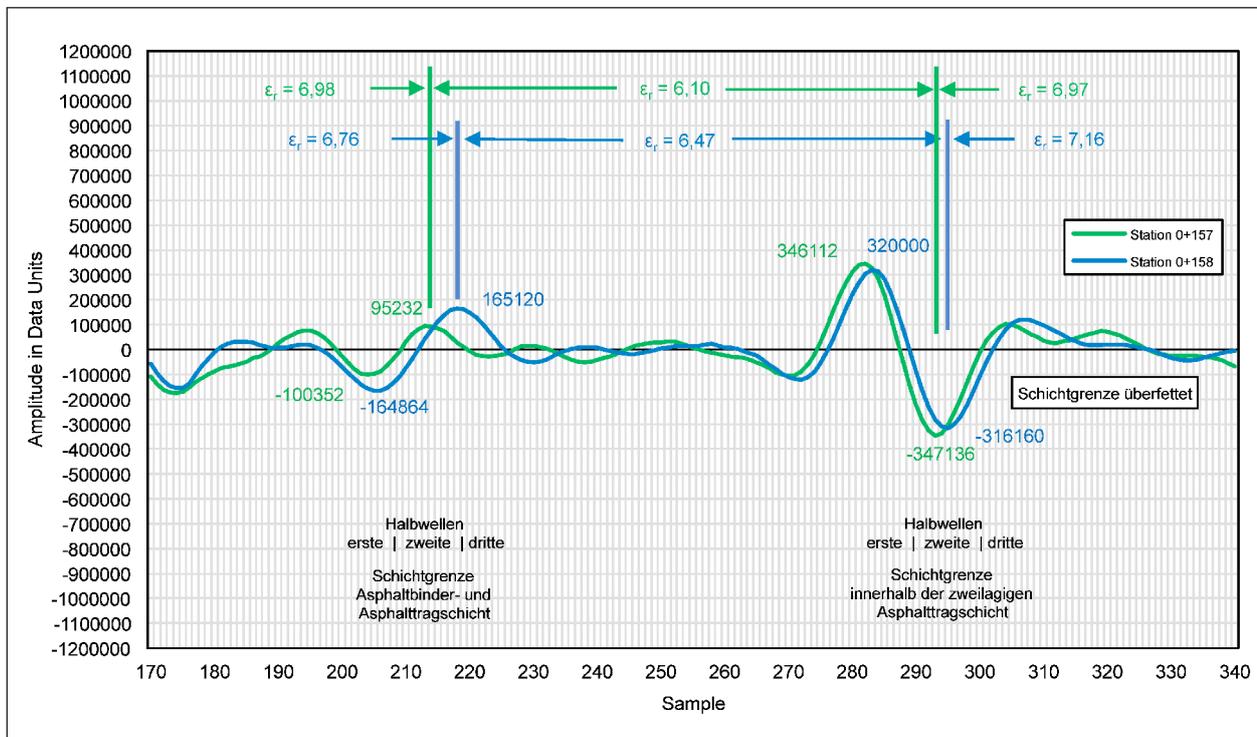


Bild 44: Wellenmuster von Schichtgrenzen mit Schichtenverbund und im überfetteten Zustand im O-Scope in der Messlinie 1 an den Stationen 0+157 und 0+158

im Wesentlichen aus zwei gegenläufig polarisierten Halbwellen zusammen, welche eine vergleichbare Größe der Amplitude aufweisen. Darüber hinaus ist die erste Halbwelle negativ und die zweite Halbwelle positiv polarisiert. Die dritte Halbwelle kann als Nachläufer charakterisiert werden, welcher von untergeordneter Bedeutung für die visuelle Auswertung ist. Ferner zeigt sich durch den unterschiedlichen dielektrischen Kontrast zwischen den benachbarten Asphalttschichten, dass die abnehmende relative Permittivität eine kleinere Amplitude erzeugt, welches wiederum zu einem positiven Reflexionskoeffizienten führt (Kapitel 8.2.4).

Bild 44 zeigt in der Schichtgrenze zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht einen mit Bild 43 vergleichbaren Verlauf der Amplitude bei gleichen Rahmenbedingungen. So wurde ein ausreichender Schichtenverbund festgestellt und durch die Abnahme der relativen Permittivität eine kleinere Amplitude festgestellt, wobei zwei gegenläufig polarisierte Halbwellen als maßgebend interpretiert werden konnten. Die erste Halbwelle war erneut negativ polarisiert.

Im Bereich der Schichtgrenze innerhalb der zweilagigen Asphalttragschicht ist an dieser Stelle eine Phasenumkehr ersichtlich, sodass die erste größere Halbwelle positiv polarisiert ist und die zweite negativ. Beide Halbwellen weisen eine vergleichbare Größe der Amplitude auf. Unter Berücksichtigung der bautechnischen Rahmenbedingungen herrschte in den dargelegten Stationen 0+157 und 0+158 kein Schichtenverbund vor. Der Bereich der Versuchsstrecke war in dieser Schichtgrenze künstlich mit einer wesentlich erhöhten Anspritzmenge an Bitumenemulsion überfettet worden.

Bild 45 zeigt in der Schichtgrenze zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht den vorgenannten Verlauf zweier gegenläufig polarisierter Halbwellen einer Schichtgrenze mit ausreichendem Schichtenverbund. Dabei ist auffällig, dass in der Station 0+159 die relative Permittivität zur unterhalb der Grenzschicht liegenden Asphalttragschicht abnimmt, aber die Amplitude erheblich ausgeprägter ist, als es sich in den Bildern 43 und 44 darstellt. Darüber hinaus scheint die Veränderung der relativen Permittivität zwischen der Schicht oberhalb der

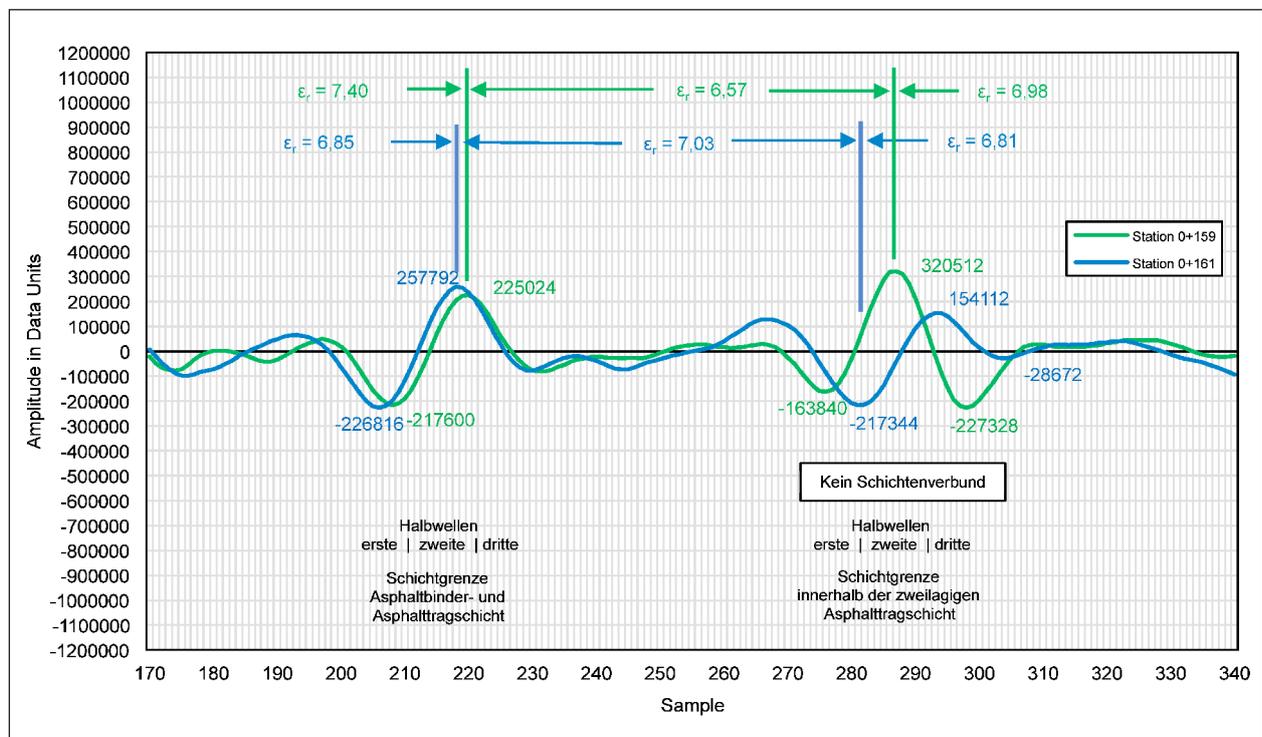


Bild 45: Wellenmuster von Schichtgrenzen mit und ohne Schichtenverbund im O-Scope in der Messlinie 1 an den Stationen 0+159 und 0+161

Grenzfläche zu der Schicht unterhalb der Grenzfläche bei ausreichendem Schichtenverbund keinen wesentlichen Einfluss auf das Wellenmuster zu haben.

Im Bereich der Schichtgrenze innerhalb der zweilagigen Asphalttragschicht zeigt sich das klassische Wellenmuster in der Schichtgrenze aus drei Halbwellen, wie es zum Beispiel FUNK et al., 1996 beschrieben hat. Demnach besteht eine Schichtgrenze aus drei Halbwellen, wobei die erste und dritte Halbwellen gleichartig und die mittlere Halbwellen entgegengesetzt polarisiert ist. Dabei liegt eine Phasenverschiebung zwischen den beiden dargestellten Scans je nach Halbwellen zwischen fünf und sechs Samples vor. Darüber hinaus wurde an beiden Stationen an den korrespondierenden Bohrkerne kein Verbund in dieser Schichtgrenze festgestellt. Die Veränderung der relativen Permittivität übt in diesem Zusammenhang keinen Einfluss auf die Polarisierung der Halbwellen aus.

Bild 46 zeigt die Wellenmuster der Stationen 0+060 und 0+061 der Messlinie 1 für die Schichtgrenzen zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht, innerhalb der zweilagigen Asphalttragschicht sowie für die Asphaltgrenze. Dabei wird ersichtlich, dass das Wellenmuster bei vorhandenem Schichtenverbund zwischen der Asphaltbinder- und

Asphalttragschicht aus zwei maßgebenden Halbwellen sowie einem schwachen Vorläufer besteht, welche entgegengesetzt polarisiert sind. Die erste maßgebende Halbwellen ist dabei erneut negativ polarisiert.

In der Schichtgrenze der zweilagigen Asphalttragschicht drückt sich der nicht vorhandene Schichtenverbund in Form von drei Halbwellen aus. Dies kann anhand der jeweils unterschiedlichen Ausprägung der einzelnen Halbwellen erkannt werden. Die Rahmenbedingungen entsprechenden dabei der Amplitudencharakteristik der Station 0+161 in Bild 45. Durch die Abnahme der relativen Permittivität bei gleichzeitig nicht vorhandenem Schichtenverbund ist die Amplitude der zweiten Halbwellen negativ polarisiert.

Der Amplitudenverlauf der Asphaltgrenze zeigt einen genau entgegengesetzten Verlauf auf. So ist bei nicht vorhandenem Verbund zwischen der Asphalttragschicht und der darunterliegenden Frostschutzschicht die mittlere Halbwellen positiv polarisiert. Dies könnte möglicherweise auf die größere relative Permittivität der Frostschutzschicht gegenüber der Asphalttragschicht zurückgeführt werden. Diese stellt im vorliegenden Anwendungsfall eine unbekannte Größe dar, da die FSS kein Bestandteil der eigentlichen Auswertung war. Gemäß der ein-

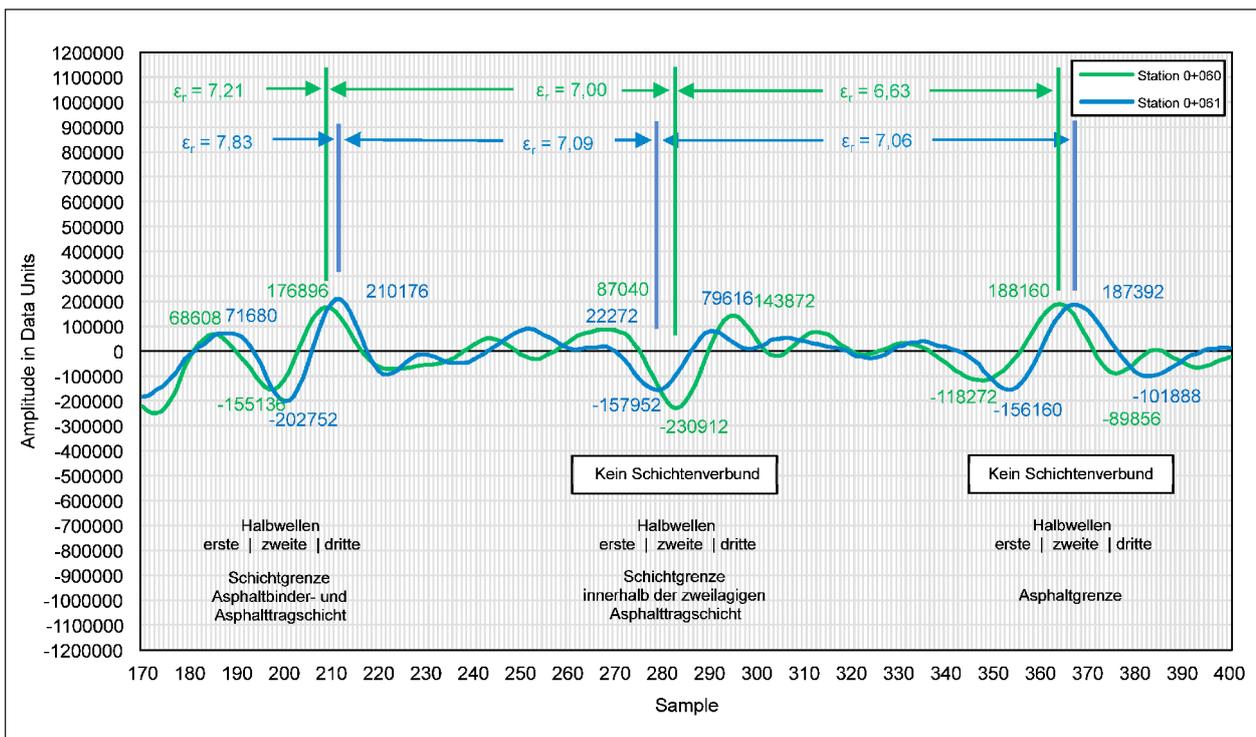


Bild 46: Wellenmuster von Schichtgrenzen mit und ohne Schichtenverbund im O-Scope mit ergänzender Betrachtung der Asphaltgrenze in der Messlinie 1 bei ausschließlicher Abnahme von ε_r an den Stationen 0+060 und 0+061

schlägigen Literatur wird die relative Permittivität von Schotter in Abhängigkeit von der Gesteinsart mit 3,00 bis 10,00 angegeben. Da in der Regel allerdings kein trockener Schotter zu erwarten ist und auf der Versuchsstrecke gleichermaßen mehrere Regenereignisse zwischen Herstellung der Versuchsstrecke und Durchführung der Georadarmessungen stattfanden, kann die relative Permittivität der Frostschuttschicht im feuchten Zustand näherungsweise mit 6,00 bis 8,00 angegeben werden [DGZfP Merkblatt B 10, 2008] und demnach durchaus größer sein, als die relative Permittivität der Asphalttragschicht.

Bild 47 zeigt als weiteres Beispiel die Wellenmuster der Stationen 0+065 und 0+067 für die Schichtgrenzen zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht, innerhalb der zweilagigen Asphalttragschicht sowie für die Asphaltgrenze. Dabei zeigt sich, dass vorhandener Schichtenverbund, wie in den vorherigen Bildern, durch zwei entgegengesetzt polarisierte Halbwellen mit vergleichbaren Amplitudenwerten sowie einem schwächeren Nachläufer dargestellt wird. Der nicht vorhandene Schichtenverbund, wie beispielsweise innerhalb der zweilagigen Asphalttragschicht, ist deutlich durch drei Halbwellen charakterisierbar, wobei die erste und dritte Halbwelle gleichartig polarisiert sind.

Im Bereich der Asphaltgrenze zeigt sich an den beiden dargelegten Stationen ein identisches Wellenmuster, wobei eine Phasenverschiebung um fünf Samples von 352 (Station 0+065) auf 357 (Station 0+067) vorliegt. Beide Stationen zeigen ein Wellenmuster aus drei Halbwellen auf.

Das abschließende Bild 48 zeigt den Amplitudenverlauf des Scans an der Station 0+066 der Messlinie 1, welcher zwischen den in Bild 47 dargestellten Scans liegt. Im Bereich der Schichtgrenze zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht zeigt dieser Scan einen Widerspruch zu den bisherigen Amplitudencharakteristika auf, da der vorhandene Schichtenverbund durch drei Halbwellen dargestellt wird, welche zuvor ausschließlich als Charakteristikum für nicht vorhandenen Schichtenverbund eingeschätzt wurden. Dadurch kann als abschließende Schlussfolgerung keine eindeutige und belastbare Systematik in der visuellen Charakterisierung von nicht vorhandenem Schichtenverbund anhand von O-Scopes aufgezeigt werden.

Tendenziell weist eine Schichtgrenze ohne ausreichenden Schichtenverbund im O-Scope in der Regel drei Halbwellen mit Extremwerten auf, wobei die erste und dritte Halbwelle als Vor- bzw. Nachläufer gleichartig polarisiert sind. Als zweiter möglicher Amplitudenverlauf wurde festgestellt, dass unzurei-

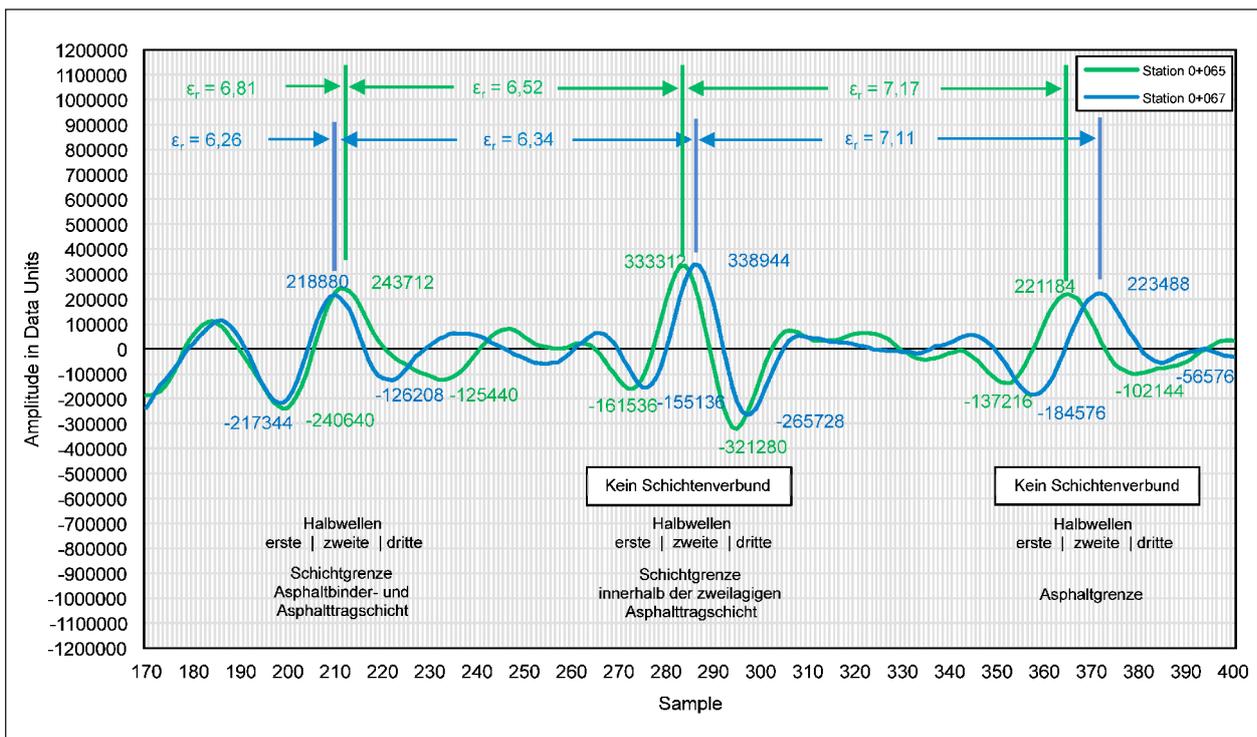


Bild 47: Wellenmuster von Schichtgrenzen mit und ohne Schichtenverbund im O-Scope und ergänzender Betrachtung der Asphaltgrenze in der Messlinie 1 an den Stationen 0+065 und 0+067

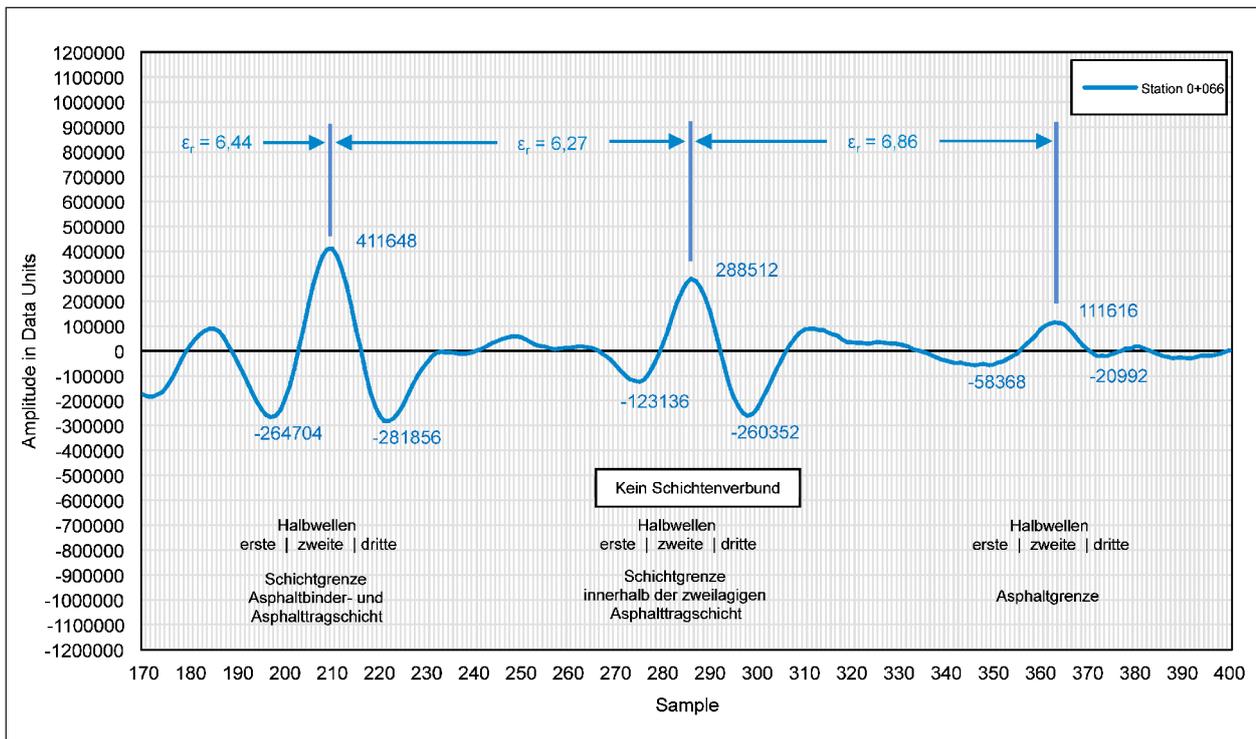


Bild 48: Wellenmuster von Schichtgrenzen mit und ohne Schichtenverbund im O-Scope sowie mit zu- und abnehmender relativer Permittivität an der Station 0+066

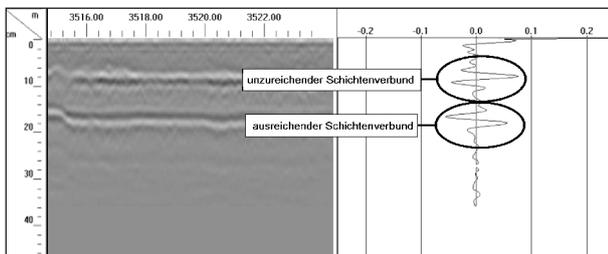


Bild 49: Amplitudencharakteristika einer Schichtgrenze mit und ohne ausreichendem Schichtenverbund (Display Gain = 12)

chender Schichtenverbund ebenfalls anhand von zwei gegensätzlich polarisierten Halbwellen dargestellt werden kann, wobei die erste Halbwellen als Vorläufer positiv polarisiert ist. Charakteristisch ist ferner, dass beide maßgebenden Halbwellen näherungsweise gleich große Amplituden aufweisen. Dies ist im Falle eines Verlaufs mit drei Extremwerten nicht gegeben, da die zweite Halbwellen erheblich größer gegenüber der ersten und dritten Halbwellen ist.

Eine Schichtgrenze mit ausreichendem Schichtenverbund basiert ebenfalls auf zwei entgegengesetzt polarisierten Halbwellen bzw. Extremwerten, wobei

die erste Halbwellen negativ polarisiert ist (Bild 49). Eine Korrelation zwischen dem dielektrischen Kontrast und der Ausprägung der Amplituden konnte anhand der vorliegenden Auswertungsergebnisse nicht belastbar abgeschätzt werden. Tendenziell führt allerdings eine Abnahme der relativen Permittivität zur unterhalb der Grenzfläche befindlichen Schicht, zu einer kleineren Amplituden und einem positiven Reflexionskoeffizienten (Kapitel 8.2.4).

8.2.3 Migration von Diffraktionshyperbeln

Zur korrekten Verortung und Darstellung von quer zur Messrichtung verlaufenden Schädigungen und Merkmalen in der Straßensubstanz bietet es sich an, die entsprechenden Diffraktionshyperbeln als visuelle Charakteristika im Radargramm zu migrieren. Diese Migration verschiebt die Reflexionspunkte auf ihre korrekte räumliche Lage und entfernt die Reflexionen, die sich aus der Geometrie der Reflexion ergeben. Somit werden Geometrie und Lage des Substanzmerkmals oder der Substanzschädigung im Radargramm korrekt dargestellt (Bild 50). Die Migration einer Diffraktionshyperbel fokussiert diese im Scheitelpunkt.

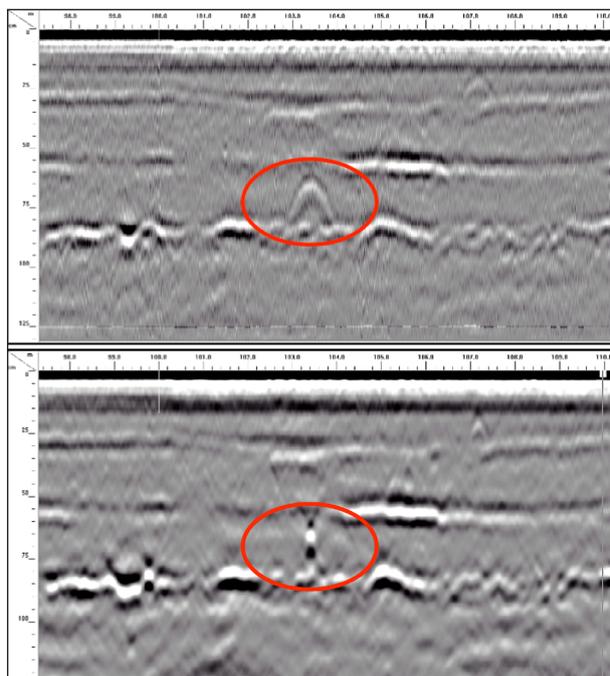


Bild 50: Diffraktionshyperbel eines Hohlraums $D = 3,0$ cm
(oben nicht migriert – unten migriert)

8.2.4 Quantifizierung von elektromagnetischen Parametern

Die Quantifizierung von elektromagnetischen Parametern zur systematischen Erkennung von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen ist vor dem Hintergrund der Ausprägung entsprechender visueller Charakteristika im Radargramm und im O-Scope ausschließlich für in Messrichtung verlaufende Schädigungen und Merkmale sinnvoll, da auf eine größere Datengrundlage mit konstanten elektromagnetischen Eigenschaften zurückgegriffen werden kann. Im Falle von quer zur Messrichtung verlaufenden Schädigungen und Merkmalen liegen, durch die datenseitige Wiedergabe in Form von Diffraktionshyperbeln, sowohl eine kleinere Datengrundlage durch eine geringere Anzahl an betroffenen Scans als auch ein sich kontinuierlich veränderndes elektromagnetisches Eigenschaftsprofil vor. Dies ist auf den geneigten Reflexionen mit variierender Signallaufzeit begründet (Bild 15). Eine Quantifizierung von elektromagnetischen Eigenschaften, um derartige Bereiche in den Georadar-Daten systematisch abzuleiten, erscheint somit als unmöglich. Eine rein visuelle Auswertung der Radargramme ist in diesem Zusammenhang zu favorisieren.

Zu den in Messrichtung verlaufenden Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen zählt in erster Linie der geschädigte Schichtenverbund zwischen zwei Schichten im Asphaltdeckschichtbau. Vor dem Hintergrund der Ableitung der Schädigung durch elektromagnetische Parameter sind Veränderungen in der Abfolge und Polarisation der Amplituden respektive Halbwellen in der Schichtgrenze und im dielektrischen Kontrast zwischen den Schichten denkbar. Da die Wellenmuster in diesem Zusammenhang zunächst visuell anhand der O-Scopes festgestellt werden, handelt es sich in erster Linie um eine visuelle Auswertung. Hierbei ist der dielektrische Kontrast der Schichtgrenze von vordringlicher Bedeutung, welcher sich durch den Reflexionskoeffizienten RI nach (3.12) und Transmissionskoeffizienten TI nach (3.13) beschreiben lässt (Kapitel 3.2.2).

Im vorliegenden Anwendungsfall wurden die Teilflächen der Objektebene, welche keinen Schichtenverbund aufwiesen, mittels der im 1m-Raster entnommenen Bohrkerne eingegrenzt und auf Basis der jeweils betroffenen Schichtgrenze sortiert. Mittels der an den Bohrkernen ermittelten Tiefe der Schichtgrenzen sowie der errechneten Signallaufzeiten, wurden die relativen Permittivitäten der einzelnen Schichten sowie die Reflexions- und Transmissionskoeffizienten berechnet. Als Vergleichsgröße wurden die Koeffizienten für die Bereiche mit vorhandenem Schichtenverbund ebenfalls berechnet.

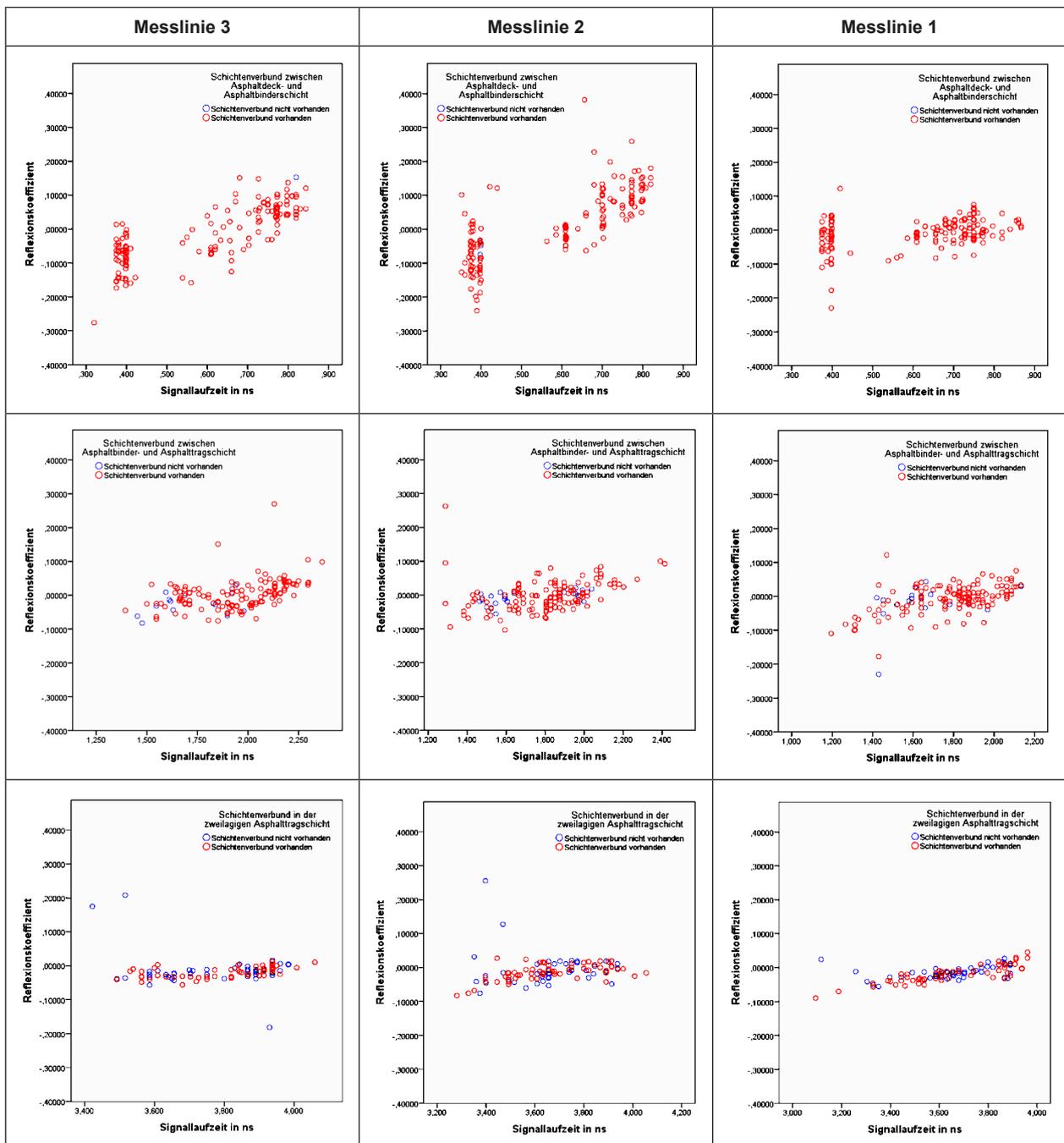
Gemäß der Studie zur Quantifizierung der relativen Permittivität (Kapitel 8.1.3) variiert die relative Permittivität der vorhandenen Asphaltdeckschichten mit Ausnahme der Asphaltdeckschicht nur marginal. Die Unterschiede in der Asphaltdeckschicht sind dabei auf die Problematik der ungenügenden Auflösung und Erkennung im Radargramm als Resultat der geringen Schichtdicken im Vergleich zur genutzten Messfrequenz und Wellenlänge zurückzuführen. Aufgrund dieser Ergebnisse, wurden die Signallaufzeiten der Messdaten der Scanrate 10 Scans/m beispielhaft für die Berechnung der relativen Permittivitäten sowie der Reflexions- und Transmissionskoeffizienten der Asphaltdeckschichten genutzt und als repräsentativ für die weiteren Scanraten des Variantenvergleichs eingestuft. Die Auswertung unterlag darüber hinaus den Unterscheidungskriterien Messlinie und Schichtgrenze sowie der grund-

sätzlichen Klassifizierung hinsichtlich vorhandenem und nicht vorhandenem Schichtenverbund. Die Art der Schädigung des Schichtenverbundes aus Absonderung bzw. geschlossenem Wasserfilm wurde nicht betrachtet, sondern vielmehr die Option eines grundsätzlichen Zusammenhangs untersucht. Die Messergebnisse sind der Anlage L zu entnehmen.

Tabelle 23 zeigt Korrelationen zwischen der Signallaufzeit und den berechneten Reflexionskoeffizienten unter Berücksichtigung der Klassifizierung aus

vorhandenem (rote Punktdarstellung) und nicht vorhandenem Schichtenverbund (blaue Punktdarstellung) für die Schichtgrenzen des Asphaltoberbaus auf.

Die Verteilung der Reflexionskoeffizienten zeigt, dass kein Rückschluss auf vorhandenen oder nicht vorhandenen Schichtenverbund anhand des dielektrischen Kontrastes respektive der Abfolge der relativen Permittivitäten möglich ist. So variieren die Reflexionskoeffizienten unabhängig der Charakte-



Tab. 23: Verteilung der Reflexionskoeffizienten nach (3.12) zur Einschätzung des Schichtenverbundes in Bezug auf die Signallaufzeit

ristik der Schichtgrenze zwischen $-0,1$ und $0,1$, wobei einzelne Extremwerte durch Abweichungen in der Signallaufzeit auftreten. Darüber hinaus zeigt der Vergleich der Messlinien vergleichbare Streuungen der Reflexionskoeffizienten innerhalb der Schichtgrenzen, wobei diese mit zunehmender Tiefe tendenziell abnehmen. Im Bereich der Asphaltdeckschicht lassen sich die Belastungsklassen Bk3,2 und Bk100 deutlich als Cluster voneinander abgrenzen.

8.3 Definition von homogenen Abschnitten

8.3.1 Allgemeine Definitionsgrundlagen

In den „Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen“ (RPE-Stra) werden homogene Abschnitte als Vorstufe zur Bildung von Baulosen definiert, welche Homogenität in bestimmten Kriterien aufweisen. Zu diesen Kriterien zählen unter anderem die Befestigungsart, eine vergleichbare Entwicklung der Zustandsmerkmale der ZEB und der Konstruktionsaufbau. Die Bildung von homogenen Abschnitten kann dabei mittels einem oder mehreren Kriterien vorgenommen werden. Dabei ist Homogenität als gleichartiger Zustand eines Streckenabschnittes unter gleichartigen Rahmenbedingungen definiert. Für den vorliegenden Anwendungsfall wurden auf Basis dessen drei Homogenitätskriterien entwickelt, welche aus den Messdaten des Georadars ableitbar sind:

1. Verlauf der dimensionierungsrelevanten Asphaltgrenze innerhalb einer definierten Wertespanne
2. Gleichartiger gebundener und gegebenenfalls ungebundener Konstruktionsaufbau sowie Unterbau und Untergrund
3. Gleichartiger qualitativer Zustand der Straßen-substanz vor dem Hintergrund flächenhafter Substanzschädigungen

Bei diesen Homogenitätskriterien handelt es sich einerseits um eine quantitative Analyse der Messdaten des Georadars, wobei aus dimensionierungsrelevanten Gründen ausschließlich die Asphaltgrenze als maßgebende Größe für die Dicke des gesamten Asphaltoberbaus als relevant angesehen wurde. Andererseits ist auch eine qualitative und ingenieurtechnische Analyse vorzunehmen, da die Feststellung von flächenhaften Substanzschädi-

gungen vordringlich anhand einer visuellen Interpretation der Radargramme der Georadarmessungen als zielführend einzuschätzen ist. Die Eingrenzung der entsprechenden Bereiche innerhalb eines Untersuchungsabschnitts ist mithilfe der optischen Gleichartigkeit von Schichtgrenzen im Radargramm vorzunehmen und durch die gezielte Verortung einer Entnahmestelle innerhalb dieses Bereiches zu stützen.

Auf Basis jedes Homogenitätskriteriums wurden alle Untersuchungsabschnitte der Netzebene in homogene Abschnitte unterteilt, wobei ein Abschnittswechsel auf die Verletzung von mindestens einem Kriterium zurückgeführt wurde. Zur Überprüfung der Funktionalität dieser Vorgehensweise wurde darüber hinaus die idealisierte Objektebene anhand der vorgenannten Kriterien zu Referenzzwecken untersucht (Kapitel 8.3.5).

Die grundsätzliche Vorgehensweise in der qualitativen Ermittlung homogener Abschnitte beruhte somit zunächst auf einer visuellen Vorauswertung der Radargramme, wobei eine Eingrenzung hinsichtlich der Gleichartigkeit des Konstruktionsaufbaus durch die Anzahl und Lage der Schichtgrenzen vorgenommen wurde. Darüber hinaus wurden Bereiche mit augenscheinlich flächenhaften Substanzschädigungen, wobei dies in erster Linie den nicht vorhandenen Schichtenverbund und offenporige Strukturen innerhalb einzelner Schichten betraf, abgegrenzt. Auf Basis dieser Vorauswertung wurden die Bohrkernentnahmestellen für die Beprobung festgelegt, wobei ergänzend zu den vorgenannten Abgrenzungen auch kleinräumige Bereiche mit potenziell lokalen Substanzschädigungen oder Substanzmerkmalen in die Festlegung aufgenommen wurden.

Grundsätzlich wurde mindestens eine Entnahmestelle in jedem als homogen definierten Bereich verortet. Die Entnahme in ungeschädigten Bereichen diente in diesem Zusammenhang der Feststellung des tatsächlichen Konstruktionsaufbaus hinsichtlich Schichtenfolge und Tiefe der Schichtgrenzen. Anhand dessen wurden die elektromagnetischen Eigenschaften aus Ausbreitungsgeschwindigkeit v nach (3.17) und relativer Permittivität ϵ_r nach (3.8) für alle vorhandenen Schichten ermittelt und auf diese Weise die Georadar-Daten innerhalb des homogenen Abschnittes kalibriert (Auswertemethode 3 „kalibriert_default_Value“). Die weiteren Entnahmestellen dienten der Verifizierung der visuell vermuteten flächenhaften Substanzschädigungen und

um deren Art und Ausprägung in vertikaler Richtung festzustellen. Es handelte sich jeweils um punktuelle Aufschlüsse, welche repräsentativ für den als gleichartig und homogen interpretierten Bereich des Untersuchungsabschnitts stehen.

Anhand der labortechnischen Ansprache der entnommenen Bohrkerne konnte darüber hinaus eine Bewertung des als homogen definierten Bereichs des Untersuchungsabschnitts hinsichtlich der Schichtenfolge und Gesamtdicke des gebundenen Oberbaus vorgenommen werden. Darüber hinaus konnte eine materialtechnologische Ansprache erfolgen und auf diese Weise zusätzliche Abschnittswechsel auf Basis der Zusammensetzung der vorhandenen Schichten erfolgen. Dies betraf zum Beispiel den Vergleich von Asphalttragschichten und unbewehrten Betontragschichten (Bild 42).

Abschließend wurden die vorhandenen Schichtgrenzen im Radargramm gemäß dem in Kapitel 3.4 vorgestellten Processing und Post-Processing interpretiert. Im Zuge dessen wurden die CSV-Exportdateien jedes Untersuchungsabschnitts in Bezug auf die Veränderungen in der Charakteristik der Schichtgrenzen aus Verlauf und Tiefe ausgewertet. Dies diente der Verfeinerung der im Rahmen der Vorauswertung definierten und durch die Beprobung modifizierten homogenen Abschnitte. Abschließend wurde auf Basis der Gesamtdicke des Asphaltoberbaus durch die Angabe der Asphaltgrenze der homogenen Abschnitte eine Klassifizierung der Belastungsklasse gemäß den RStO durchgeführt.

Da häufig keine Deckungsgleichheit in der Länge des jeweiligen homogenen Abschnittes zwischen den drei Homogenitätskriterien zu erwarten ist, empfiehlt sich eine Verschneidung und parallele Betrachtung aller drei Kriterien. Ferner erscheint es zweckmäßig, eine Plausibilitätsprüfung jedes auf diese Weise ermittelten homogenen Abschnittes durchzuführen, um die bautechnische und ökonomische Zweckmäßigkeit, zum Beispiel in der Erhaltungsplanung, zu gewährleisten. Gegebenenfalls sind mehrere homogene Abschnitte zusammenzuführen, um beispielsweise bautechnisch sinnvolle Mindestabschnittslängen zu erzielen.

In der Anlage M sind die mittels der vorgenannten Homogenitätskriterien ermittelten homogenen Abschnitte jedes Untersuchungsabschnitts der Netzebene aufgeführt. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass seitens der Verfasser keine Plausibilitätsprü-

fung vorgenommen wurde, da ausschließlich die grundsätzliche Funktionalität und Praktikabilität der entwickelten Berechnungsmethoden im Vordergrund standen. Eine abschließende Visualisierung aller drei entwickelten Homogenitätskriterien ist beispielhaft in Kapitel 14.2.2 gegeben.

8.3.2 Verlauf der dimensionierungsrelevanten Asphaltgrenze

Die Asphaltgrenze, als Übergang vom gebundenen zum ungebundenen Oberbau, stellt die maßgebende Schichtgrenze in Bezug auf die Dimensionierung gemäß den RStO dar. Das Messergebnis der Georadarmessung umfasst als Datensatz die Tiefe der Asphaltgrenze in einem definierten Stationierungsraster. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde dieses auf einen Meter festgelegt. Im Zuge der Einordnung der Asphaltgrenze in eine Dimensionierung wird jedem exportierten Datenwert eine Belastungsklasse zugeordnet, wobei die Zuordnung von der gewählten Oberflächenbefestigung und Bauweise abhängt. Die Wahl eines engmaschigen Stationierungsrasters gewährleistet hierbei eine gute Genauigkeit in der Wiedergabe des Verlaufs der Asphaltgrenze. Gleichzeitig bedeutet dies allerdings eine größere Datenmenge, welche es innerhalb der Datenauswertung und Dateninterpretation zu verarbeiten gilt.

Vor dem Hintergrund der ingenieurtechnischen Festlegung von homogenen Abschnitten, unter Berücksichtigung baupraktischer und ökonomischer Aspekte, wie zum Beispiel Mindestabschnittslängen [FGSV Arbeitspapier Nr. 431, 2009], ist es sinnvoll, eine Zusammenfassung der Messwerte zu einem gröberen Stationierungsraster vorzunehmen. Dabei ist eine Abwägung zwischen der Genauigkeit hinsichtlich der Tiefe und des Verlaufs der Asphaltgrenze und einer für die Auswertung und ingenieurtechnische Interpretation praktikablen Datenmenge zu treffen.

Im vorliegenden Anwendungsfall wurde dieses Raster mit einer Stationierungslänge von 20,00 Metern festgelegt. Dies reduzierte die Datenmenge auf ein übersichtlicheres Maß und gewährleistete gleichzeitig eine als ausreichend empfundene Genauigkeit (Tabelle 24). Darüber hinaus wurde die Option der datenseitigen Verschneidung mit weiteren zerstörungsfreien Messmethoden aufrechterhalten, da eine Zusammenlegung von fünf Auswerteabschnitten zu einer Abschnittslänge von insgesamt 100,00

Station der Messwerte des CSV-Exports in m	Tiefe der Asphaltgrenze in cm	Auswerteabschnitte im definierten Rastermaß in m	Arithmetisches Mittel \bar{x} in cm	Relative Abweichung zum vorherigen AA	Kumulierte relative Abweichung	Erfüllungsgrad beider Unterkriterien 1 = erfüllt 0 = nicht erfüllt
0	31,8	0	31,610	0,000	0,000	1
1	30,7	20	32,090	0,015	0,015	1
2	32,6	40	31,905	-0,006	0,009	1
3	31,8	60	33,880	0,062	0,071	1
4	30,8	80	33,010	-0,026	0,045	1
5	32,5	100	31,415	-0,051	-0,006	1
6	33,7	120	31,120	-0,009	-0,015	1
7	32,6	140	31,305	0,006	-0,009	1
8	33,4	160	30,905	-0,013	-0,022	1
9	33,0	180	32,125	0,039	0,017	1
10	30,8	200	33,450	0,041	0,058	1
11	31,0	220	33,445	0,000	0,058	1
12	31,0	240	31,720	-0,054	0,004	1
13	31,3	260	34,060	0,074	0,078	1
14	29,6	280	32,155	-0,059	0,018	1
15	31,4	300	34,950	0,087	0,105	1
16	30,7	320	34,770	-0,005	0,100	1
17	30,8	340	33,060	-0,052	0,048	1
18	31,3	360	34,990	0,058	0,107	1
19	31,4	380	34,350	-0,019	0,088	1
20	31,8	400	34,095	-0,007	0,081	1

Tab. 24: Beispielhafter Auszug aus der Berechnungsgrundlage zur maximalen Änderung der Asphaltgrenze aufeinanderfolgender Auswerteabschnitte (AA) des Untersuchungsabschnitts der BAB 14

Metern möglich war. Dies entspricht der Länge eines Bewertungsabschnittes der messtechnischen ZEB gemäß den ZTV ZEB-StB sowie der Abschnittslänge der Griffigkeitsmessung mit dem Seitenkraftmessverfahren (SKM) bei Geschwindigkeiten > 50,0 km/h [M BGriff, 2012], welches für den vorliegenden Anwendungsfall maßgebend für die Bestimmung der Griffigkeit der Straßenoberfläche ist.

Das Homogenitätskriterium wurde hinsichtlich des Verlaufs der dimensionierungsrelevanten Asphaltgrenze derart definiert, dass eine Schwankung innerhalb einer herstellungsbedingten vertretbaren Wertespanne erlaubt war, ohne dass ein Abschnittswechsel ermittelt wurde. Dazu wurden zwei Berechnungsalgorithmen als Unterkriterien entwickelt:

1. Der arithmetische Mittelwert der Asphaltgrenze (AG) eines beliebigen Auswerteabschnitts ermit-

telt sich nach (8.7). Dieser darf weniger als $\pm 20,0\%$ vom arithmetischen Mittelwert des vorherigen Auswerteabschnitts abweichen (8.8).

$$\bar{x}_{AG,n} = \frac{1}{20} \times \sum_{i=20 \times (n-1) + 1}^{20 \times n} x_i \quad (8.7)$$

$$\Delta AG_n = \frac{(\bar{x}_{AG,n+1} - \bar{x}_{AG,n})}{\bar{x}_{AG,n}} < \pm 0,2 \quad (8.8)$$

Mit

n: beliebiger Auswerteabschnitt aus 20 Einzelwerten der Asphaltgrenze

x_i : Einzelwert der Asphaltgrenze innerhalb eines Auswerteabschnitts in cm

$\bar{x}_{AG,n}$: Arithmetischer Mittelwert der Asphaltgrenze des n-ten Auswerteabschnitts in cm

$\bar{x}_{AG,n+1}$: Arithmetischer Mittelwert der Asphaltgrenze des (n+1)-ten Auswertungsabschnitts in cm

ΔAG_n : Relative Änderung der Asphaltgrenze vom n-ten zum (n+1)-ten Auswertungsabschnitt

2. Die relative Änderung der Asphaltgrenze des nächsten Auswertungsabschnitts beträgt kumulativ mit den Abweichungen aller vorherigen als homogen definierten Auswertungsabschnitten nach (8.9) weniger als $\pm 20,0\%$.

$$\sum_{n=1}^j \Delta AG_n < \pm 0,2 \quad (8.9)$$

Ein homogener Abschnitt endete, wenn mindestens eins der beiden Unterkriterien verletzt wurde.

Für die Einhaltung des Homogenitätskriteriums wird eine maximale Änderung in der Asphaltgrenze zwischen zwei aufeinanderfolgenden Auswertungsabschnitten und kumulativ zu allen vorherigen und als homogen ermittelten Auswertungsabschnitten von $\pm 20,0\%$ zugelassen. Die Herleitung des Grenzwertes ist der Anlage M1 zu entnehmen. Diese basiert auf einer Grenz betrachtung aller Änderungen zwischen aufeinanderfolgenden Auswertungsabschnitten unter Nutzung einer vereinfachten Ausreißerprüfung nach Tukey [WITTE und SPARLA, 2015]. Insgesamt umfasst die dazugehörige Datengrundlage 4.226 Auswertungsabschnitte.

Die Einteilung des Untersuchungsabschnitts in homogene Abschnitte basierte auf der Zusammenlegung benachbarter Auswertungsabschnitte bei der Erfüllung beider Unterkriterien. Die auf diese Weise definierten homogenen Abschnitte wurden in Form eines Streckenbandes visualisiert. Jeder homogene Abschnitt wurde mit der Bezeichnung „HA“ abgekürzt und fortlaufend nummeriert. Sofern ein Aus-

werteabschnitt keine Homogenität aufwies, verschiedene Bauweisen vereinte oder durch Ingenieurbauwerke unterbrochen war, wurde ein inhomogener Auswertungsabschnitt definiert (weiße Bereiche) (Bild 51).

Die Festlegung einer maximalen Änderung der Asphaltgrenze von $\pm 20,0\%$ umfasste ferner den straßenbautechnischen Aspekt des Wechsels der Belastungsklasse bei Nichterfüllung. Dieses Unterkriterium bedeutet, dass das Ende eines homogenen Abschnitts grundsätzlich mit einem Wechsel der Belastungsklasse einhergeht. Als Definitionsgrundlage wurde in diesem Zusammenhang die Gesamtdicke des Asphalt oberbaus der Bauweise „Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht“ gemäß den RStO12 (Tafel1 – Zeile1) herangezogen. Die Mindeständerung beträgt in diesem Zusammenhang $\pm 4,0$ cm.

Davon ausgenommen waren Gesamtdicken des Asphalt oberbaus von mindestens 42,5 cm als obere Grenze, da bei einer 20-prozentigen Veränderung der Asphaltgrenze kein Wechsel der Belastungsklasse Bk100 stattfinden würde. Die dazugehörige absolute Veränderung der Asphaltgrenze beträgt mindestens 8,5 cm, was straßenbautechnisch eine zusätzliche Schicht bedeuten würde. Dadurch ist ein Aufbauwechsel respektive Ende des homogenen Abschnittes bereits durch die Änderung der Schichtenfolge definiert (Kapitel 8.3.3).

Die Definition einer unteren Grenze entfiel, da geringere Gesamtdicken des Asphalt oberbaus vor dem Hintergrund des Anwendungsfalles „Bundesfernstraße in Asphaltbauweise“ und der gewählten Definitionsgrundlage „Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht“ zu niedrigeren Belastungsklassen (Bk0,3 bis Bk1,8) führen würde und dies nicht zu erwarten ist.

Auf Basis der erheblichen Änderung der Gesamtdicke des gebundenen Oberbaus besteht insgesamt

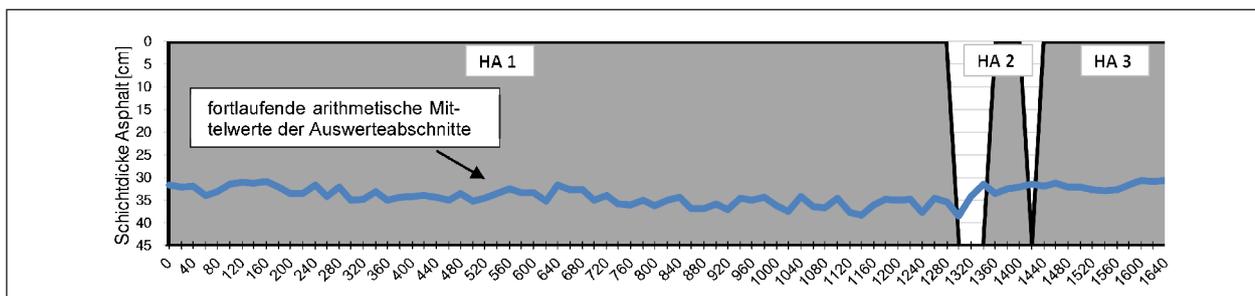


Bild 51: Auszug aus dem Streckenband der homogenen Abschnitte auf Basis der Asphaltgrenze des Untersuchungsabschnitts der BAB 14

die Möglichkeit der Zuordnung einer Dimensionierung bzw. Belastungsklasse zu jedem berechneten homogenen Abschnitt. Innerhalb einer Netzbetrachtung sind auf diese Weise zum Beispiel unterdimensionierte Streckenabschnitte definierbar.

8.3.3 Änderung des Konstruktionsaufbaus

Das Homogenitätskriterium berücksichtigt die Schichtenfolge des Untersuchungsabschnitts. Dabei ist sowohl der gebundene Oberbau als auch gegebenenfalls der ungebundene Oberbau sowie der Unterbau und Untergrund einzubeziehen. Die Änderung der Schichtenfolge wird dabei einerseits durch eine abweichende Bauweise mit gegebenenfalls abweichender Oberflächenbefestigung und andererseits über eine erhebliche Abweichung in der Dicke einzelner Schichten über eine bautechnisch relevante Länge hervorgerufen. Dies ist von großer Bedeutung, da eine Veränderung der Bauweise oder des Konstruktionsaufbaus die Herangehensweise in der Sanierung maßgeblich beeinflusst. Hintergrund ist die geänderte Materialzusammensetzung, welche die zweckmäßigen Sanierungsverfahren und die Rahmenbedingungen der Sanierung, zum Beispiel durch abweichende Frästiefen, definiert.

Die erhebliche Veränderung der Dicke einzelner Schichten in der Straßensubstanz impliziert im Sinne dieses Homogenitätskriteriums auch eine ausführungsbedingte Abweichung, durch die Herstellung einer Schicht in mehreren Lagen. Dies betrifft im Asphaltoberbau in erster Linie die Asphalttragschicht, deren Dicke gemäß den RStO12 für die im vorliegenden Anwendungsfall definierten Belastungsklassen Bk3,2 bis Bk100 bei der angenommenen Asphaltbauweise „Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht“ zwischen 12,0 und 22,0 cm liegt sowie den ungebundenen Oberbau aus Schotter- und Kiestragschichten sowie Frostschutzschichten. Im

Bereich der Asphalttragschicht korreliert dieses Homogenitätskriterium mit dem Verlauf der dimensionsrelevanter Asphaltgrenze (Kapitel 8.3.2). Darüber hinaus können durch dieses Kriterium Verstärkungsschichten im Konstruktionsaufbau berücksichtigt werden, welche durch Sanierungsmaßnahmen zu größeren Dicken einzelner Schichten geführt haben.

Die Definition der Schichtenfolge als Grundlage des Konstruktionsaufbaus wurde im vorliegenden Anwendungsfall durch die Beprobung und materialtechnologische Ansprache der aus dem Untersuchungsabschnitt entnommenen Bohrkern vorgegeben. Deren Verortung basierte auf der Vorauswertung der Georadar-Daten und der damit verbundenen visuellen Einteilung in homogene Abschnitte. Im Anschluss an die materialtechnologische Ansprache konnten die vorhandenen Schichten daraufhin konkret benannt und charakterisiert werden.

Abschließend wurde aus den auf diese Weise definierten homogenen Abschnitten (HA) ein Streckenband erstellt, welches mittels unterschiedlicher Farbcodes die verschiedenen Schichten im Konstruktionsaufbau abbildete (Bild 52).

8.3.4 Flächenhafte Schädigungen der Straßensubstanz

Streckenabschnitte mit einer geschädigten Straßensubstanz sind im Zuge der Erhaltungsplanung des Baulastträgers mit einer höheren Priorität in der Maßnahmenreihung zu versehen, um den Zielkriterien der Straßenerhaltung gerecht zu werden [MAERSCHALK und SOCINA, 2008]. Infolgedessen erscheint es sinnvoll, diese Bereiche gesondert zu betrachten. Anhand der Georadar-Daten besteht hierbei die Möglichkeit, durch die visuelle Auswertung und Interpretation der Radargramme, Substanzschädigungen hinsichtlich der Lage und Tiefe in

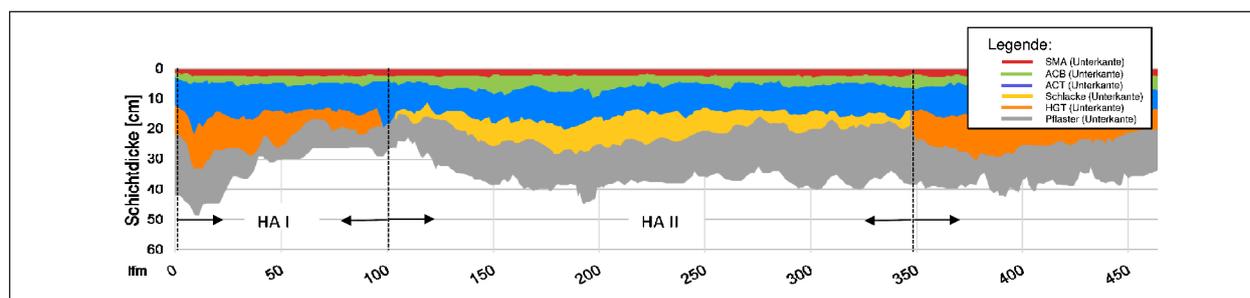


Bild 52: Beispielhafter Auszug aus dem Streckenband der homogenen Abschnitte auf Basis des Konstruktionsaufbaus des Untersuchungsabschnitts der B79

der Straßensubstanz zu verorten. Vor dem Hintergrund der Ausweisung von homogenen Abschnitten, welche die Qualität und den Zustand der Straßensubstanz aufgreifen, sind in diesem Zusammenhang flächenhafte Schädigungen von vordringlicher Bedeutung. Dazu zählen insbesondere die beiden nachfolgend aufgeführten Substanzschädigungen:

- Unzureichender Schichtenverbund zwischen einzelnen Asphaltsschichten
- Offenporige Bereiche innerhalb einzelner Asphaltsschichten

Gegebenenfalls können flächenhafte Substanzmerkmale, welche vordringlich im Bereich der tieferliegenden Schichten der Straßensubstanz oder im Untergrund auftreten, als weiteres Kriterium in die Analyse einbezogen werden. Dazu zählen zum Beispiel alte überbaute Bestandsstrukturen, welche bei den auf der Netzebene untersuchten Streckenabschnitten im Bereich der Bundesstraßen in Form von Schlacken und Mauerwerks- bzw. Betonresten festgestellt wurden. Überbaute Bestandsstrukturen korrelieren in diesem Zusammenhang mit dem Homogenitätskriterium der „Änderung des Konstruktionsaufbaus“, sofern es sich nicht um lokale Strukturen, wie zum Beispiel Kanäle, handelt.

Die Erkennung der flächenhaften Substanzschädigungen erfolgte mithilfe der visuellen Charakteristika im Radargramm sowie durch Beprobung und materialtechnologischer Ansprache der Bohrkern der Untersuchungsabschnitte. Diese wurden abschließend in Form eines Streckenbandes mittels Liniendarstellung visualisiert (Bild 53).

8.3.5 Überprüfung der Homogenitätskriterien auf Objektebene

Zur Validierung des Homogenitätskriteriums zum Verlauf der dimensionierungsrelevanten Asphaltgrenze wird dieses zur Feststellung des Aufbauwechsels an Station 0+045 der Objektebene herangezogen. Zur Vergrößerung der Datengrundlage wurden in diesem Zusammenhang alle drei Messlinien in die Auswertung einbezogen sowie ein Vergleich der Auswertemethoden „unkalibriert_default_Value“ und „unkalibriert_automatic“ durchgeführt. Hintergrund ist die voraussichtliche Nutzbarkeit einer dieser Auswertemethoden im Hinblick auf die Vorauswertung der Georadar-Daten und damit Grundlage für die Ausweisung von homogenen Abschnitten im Praxisfall. Die Bilder 54 und 55 zeigen die aus der beispielhaften Berechnung der homogenen Abschnitte resultierenden Längsprofile der Versuchsstrecke, unter Berücksichtigung folgender Rahmenbedingungen:

- Zulässige Abweichung der Änderung der Asphaltgrenze zwischen benachbarten Auswertabschnitten von $\pm 20,0\%$
- Datenraster mit einer Stationierungslänge von 5,00 m
- Messung aller drei Messlinien der Objektebene
- Scanrate 20 Scans/m

Der Vergleich der homogenen Abschnittsbildung zeigt, dass die Nutzung der Auswertemethode „unkalibriert_automatic“ zusätzliche Abschnittswechsel

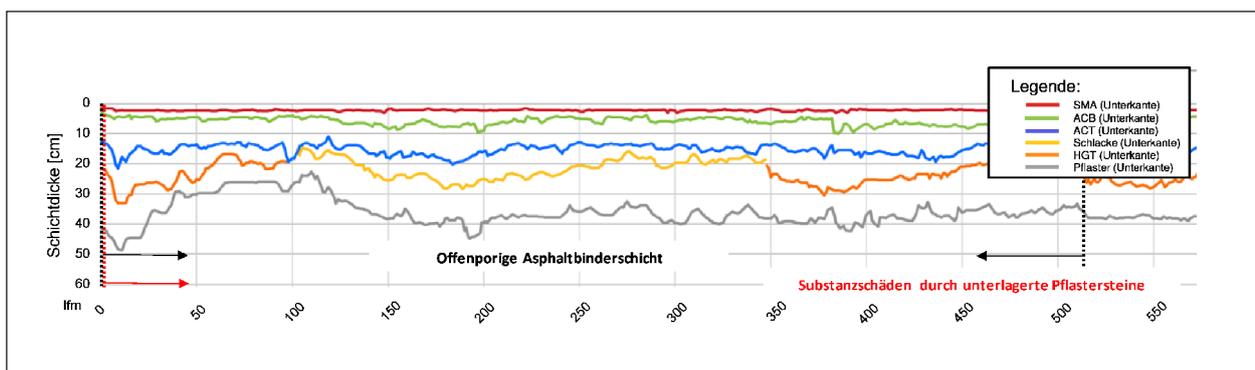


Bild 53: Auszug aus dem Streckenband der homogenen Abschnitte auf Basis der flächenhaften Schädigung der Straßensubstanz des Untersuchungsabschnitts der B79

generiert, welche faktisch anhand der entnommenen Bohrkern auf der Versuchsstrecke nicht nachweisbar sind. Die Abschnittwechsel resultieren aus lokalen Peaks der Amplituden in der Asphaltgrenze, welche gemäß der Auswertemethodik auf entsprechend niedrige Werte in der Ausbreitungsgeschwindigkeit v bzw. hohe Werte in der relativen Permittivität ϵ_r zurückzuführen sind.

Die Einzelwerte in der Anlage M2 zeigen in diesem Zusammenhang sprunghafte Anstiege der relativen Permittivität um 2,82 (Station 0+105) von 7,68 auf 10,50 und um 3,14 (Station 0+110) von 7,16 auf 10,30. Dies führt zu erhöhten arithmetischen Mittelwerten in den jeweiligen Abschnitten des definierten Stationierungsrasters und somit zu Abschnittswcheln.

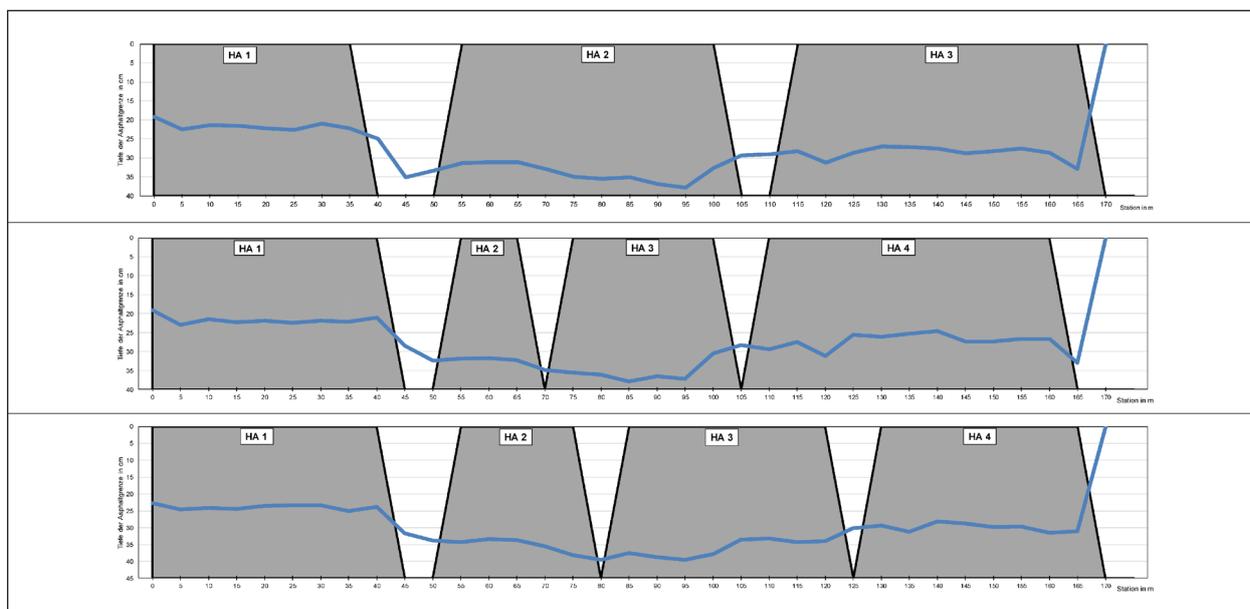


Bild 54: Homogene Abschnitte der Objektebene auf Basis der Auswertemethode „unkalibriert_automatic“ für die Messlinien 1 (oben), 2 (mitte) und 3 (unten)

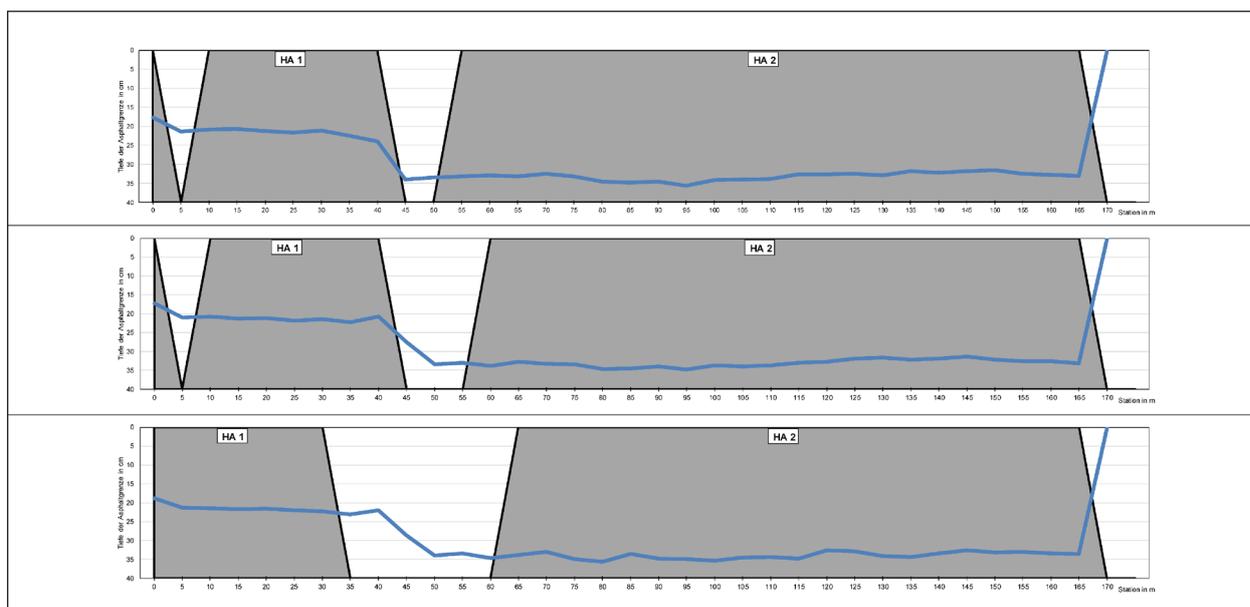


Bild 55: Homogene Abschnitte der Objektebene auf Basis der Auswertemethode „unkalibriert_default_Value“ für die Messlinien 1 (oben), 2 (mitte) und 3 (unten)

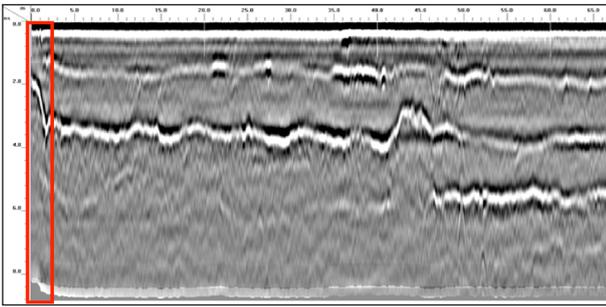


Bild 56: Bautechnisch markanter Baulosanfang der Versuchsstrecke mit erheblicher Änderung der Asphaltgrenze

Die Verwendung von „default_Values“ zeigt aufgrund der Unabhängigkeit der Auswertemethodik von den Amplitudenpeaks keine derartigen Sprünge. Es zeigt sich, dass der erwartete Abschnittswechsel ermittelt wird, wobei sich die dazugehörigen inhomogenen Bereiche in je nach Messlinie in unterschiedlichen Längen darstellen. Darüber hinaus zeigen die Messlinien 1 und 2 im Anfangsbereich der Versuchsstrecke einen weiteren Abschnittswechsel auf. Dieser ist auf den bautechnisch markanten Baulosanfang der Versuchsstrecke zurückzuführen, da dort eine erhebliche Änderung der Asphaltgrenze festzustellen war, welche straßenbautechnisch begründet ist (Bild 56) (Kapitel 8.1.2).

Insgesamt zeigen die Auswertungsergebnisse, dass die Nutzung des „default_Value“ die erwartete homogene Abschnittsbildung auf der Objektebene erzeugt hat und sich vor diesem Hintergrund als zielführender in der Anwendung darstellt. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass im vorliegenden Anwendungsfall vereinfachte Schichtenmodelle mit standardisierten Bauweisen gemäß den RStO12 vorliegen. Bei gewachsenen Konstruktionsaufbauten ist eine derartige Abgrenzung voraussichtlich schwieriger durchzuführen.

9 Definition von Messunsicherheiten und Abweichungen

9.1 Allgemeine Definitionsgrundlagen

Die Definition und Ermittlung von Messunsicherheiten und Abweichungen innerhalb des Georadarverfahrens ist auf eine Vielzahl an Einflüssen zurückzuführen. Diese sind in Bezug auf die Bewertung von Messergebnissen sowie bei einer Aussage hinsichtlich der Messgenauigkeit des Prüfverfahrens

zu berücksichtigen. Einen systematischen Ansatz, diese Einflüsse zu eruieren, als Abweichung oder Unsicherheit zu quantifizieren und bei der Ermittlung von Zielgrößen zu berücksichtigen, liefert der Guide Nr. 98-3, 2008 der ISO/IEC. Demnach sind folgende Einflüsse einzubeziehen:

1. Unvollständige Definition von Messgrößen.
2. Unvollständige Umsetzung der Definition von Messgrößen.
3. Nicht repräsentative Stichproben, um die Definition der Messgrößen umzusetzen.
4. Unzureichende Kenntnis von Umwelteinflüssen und unvollständige Messung von Umweltbedingungen.
5. Persönliche Voreingenommenheit bei der Ablesung von Messwerten und Messinstrumenten.
6. Begrenzte Auflösungsvermögen von Messinstrumenten und Grenzwerten.
7. Ungenaue Referenzwerte zu Messungen oder Einsatzmaterialien.
8. Ungenaue Referenzwerte aus externen Quellen, welche im Zuge von Algorithmen und Berechnungen genutzt werden.
9. Näherungen und Annahmen, welche in die Messmethodik und das Messverfahren einfließen.
10. Zufällige Schwankungen und Unsicherheiten bei Messwiederholungen unter scheinbar konstanten Bedingungen.

In den Kapiteln 9.2 bis 9.5 werden einige der vorgenannten Einflüsse aufgegriffen und in Bezug auf das Georadarverfahren näher erläutert. Im vorliegenden Anwendungsfall konnten diese Einflüsse allerdings nur vereinzelt quantifiziert werden, da entweder keine Vergleichswerte vorliegen, um die Größe des Einflusses grundsätzlich festzustellen oder der Einfluss an sich und der Effekt auf das Messergebnis zwar denkbar ist, aber anhand des Versuchsprogramms nicht konkret festgestellt werden konnte.

Das Georadarverfahren liefert seitens der Verfahrenstechnik quasikontinuierliche Messwerte, welche durch die Definition von messtechnischen Eingangsgrößen einen direkten Ortsbezug durch eine

Zuordnung zu einer Station bzw. zu einem Scan beinhalten. Ferner sind die gewonnenen Messdaten einzelnen Messlinien zugeordnet. Dabei umfasst jede Messlinie in Abhängigkeit von der definierten Scanrate Messpunkte in einem festgelegten Datenraster. Da jeweils eine Messlinie einer einzelnen Georadarantenne oder einem Paneel im Falle von Array-Systemen zugeordnet ist, liegt durch die spezifische Zuordnung der Messtechnik keine Mehrfachbestimmung von Messwerten im Sinne des Präzisionsgedankens des technischen Regelwerkes vor. Georadarmessungen liegen somit ausschließlich unter Wiederholungsbedingungen vor. Darüber hinaus stellen die Messwerte, unter Berücksichtigung der notwendigen Interpretation durch das auswertende Personal, auch das abschließende Messergebnis dar. Als Messwerte sind in diesem Zusammenhang die Amplituden jedes Sample eines Scans sowie die Signallaufzeit zwischen Sende- und Empfangsantenne als direkte Messgrößen zu nennen.

Diese Messgrößen unterliegen potenziellen Messunsicherheiten und Abweichungen, welche in Kapitel 9.2 näher erläutert werden. Gemäß dem Merkblatt Nr. 926 über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen Teil 1 „Grundlagen zur Präzision von Prüfverfahren“ der FGSV ist als Kenngröße für die Präzision von Prüfverfahren die Standardabweichung als Streuparameter für Mehrfachbestimmungen anzusetzen. Da im Falle des Georadarverfahrens ausschließlich ein Messwert je Messung und Station vorliegt, ist die Ermittlung der Standardabweichung der Einzelwerte im vorliegenden Anwendungsfall allerdings nicht zielführend. Ausnahmen bilden in diesem Zusammenhang der Einsatz von parallel angeordneten baugleichen Antennen mit identischen technischen Eingangsgrößen, wie zum Beispiel der Messfrequenz, sowie Array-Antennensysteme. Dabei sind die abweichende Messlinie und der damit auftretende horizontale Versatz als systematische Abweichung zu berücksichtigen und zu quantifizieren.

Die nachfolgenden Ausführungen bezüglich der anzusetzenden Präzisionsmaße beruhen auf den Untersuchungsergebnissen der Objektebene, da vor dem Hintergrund einer durchzuführenden Verträglichkeitsprüfung eine Mehrfachbestimmung einer Messgröße notwendig ist. Dies ist durch die durchgeführten Wiederholungsmessungen auf der Objektebene gewährleistet. In Bezug auf das technische Regelwerk ist zur Bestimmung der Messunsicherheit der Messgrößen die Wiederholstandardab-

weichung als Präzisionsmaß anzusetzen. Diese wird gemäß der Teile 1 und 4 des Merkblattes Nr. 926 der FGSV nach (9.1) bestimmt.

$$(\sigma_r)^2 = (\sigma_E)^2 + \frac{(\sigma_a)^2}{m} \quad (9.1)$$

Mit

σ_r : Wiederholstandardabweichung (quadriert \triangleq Wiederholvarianz)

σ_E : Standardabweichung des Messergebnisses (quadriert \triangleq Ergebnisvarianz)

σ_a : Standardabweichung der empirischen Einzelwerte aus der Bestimmung (quadriert \triangleq Bestimmungsvarianz) des Messergebnisses

m : Anzahl der Einzelwerte

Die Standardabweichung der empirischen Einzelwerte σ_a resultiert aus zufälligen Unsicherheiten und Abweichungen der notwendigen Eingangsgrößen und Spezifikationen aus der Messtechnik. Diese sind im vorliegenden Anwendungsfall nicht quantifiziert worden und können daher nur näherungsweise betrachtet werden. Die Standardabweichung unter Wiederholbedingungen schließt ferner die Ergebnisstandardabweichung σ_E ein, welche ebenfalls Grundlage der Wiederholgrenze r der Messung ist. Die Wiederholgrenze ist in diesem Zusammenhang mit der kritischen Spannweite d_r der Ergebnisse einer Doppelbestimmung unter Wiederholbedingungen in Bezug zu setzen. Demnach besteht eine Verträglichkeit zweier Messergebnisse unter Nutzung einer statistischen Sicherheit von $P = 95\%$, wenn die Wiederholgrenze die kritische Spannweite nach (9.2) nicht überschreitet.

$$d_r = W_P(n) \times \sigma_r \quad (9.2)$$

Im vorliegenden Anwendungsfall beträgt die Grundgesamtheit der Wiederholmessung $n = 3$, sodass der Faktor $W_P(n)$ gemäß dem Merkblatt „Grundlagen zur Präzision von Prüfverfahren“ Teil 1 – Tabelle 2 mit 3,31 anzusetzen ist.

Dies stellt nicht den praktischen Anwendungsfall dar, da bei einer Fragestellung zum Georadarverfahren davon auszugehen ist, dass eine Erstmessung das alleinige Messergebnis darstellt. Es ist denkbar, dass bei Zweifeln an der Richtigkeit der Messdaten und des Messergebnisses eine erneute überprüfende Messung durchgeführt werden könnte. Diese Wiederholungsmessung, sofern eine identische Messtechnik und identische Messparameter

verwendet werden, bildet mit der Erstmessung eine Grundgesamtheit von $n = 2$ und führt zur Definition der Wiederholgrenze r mit einem Faktor von $W_p(n) = 2,77$.

Neben der Überprüfung der kritischen Spannweite ist eine Verträglichkeitsprüfung von Ergebnissen unter Wiederholbedingungen durchzuführen, um die Zulässigkeit der Bildung eines arithmetischen Mittelwertes aus den entsprechenden Einzelwerten zu prüfen. Im vorliegenden Anwendungsfall ist in diesem Zusammenhang zu prüfen, ob aus den $n = 3$ Wiederholmessungen der arithmetische Mittelwert gebildet werden darf. Als zweckmäßige Messgröße ist in diesem Zusammenhang die Signallaufzeit t anzusetzen, welche eine direkte Messgröße darstellte und differenziert nach der Schichtgrenze im CSV-Export ausgegeben wurde (Kapitel 5.1.2). Die Verträglichkeitsprüfung vergleicht hierbei die kritische Spannweite der Einzelwerte d_r unter Wiederholbedingungen mit der Spannweite R als Differenz zwischen der maximalen und minimalen Signallaufzeit der Einzelwerte.

Die Verträglichkeit wurde für die auf der Objektebene ermittelten Signallaufzeiten überprüft und unter Berücksichtigung der Unterscheidungskriterien Scanrate und Messlinie für alle Stationen erfüllt. Die Ergebnisse sind in der Anlage I aufgeführt. Somit sind sämtliche gewonnene Einzelwerte miteinander verträglich und dürfen stationsgetreu zu arithmetischen Mittelwerten zusammengefasst werden.

Bei der Nutzung einer abweichenden Messtechnik bzw. Softwarelösung zur Auswertung der Georadar-Daten gelten für die kritische Spannweite der Ergebnisse entsprechend die Vergleichsbedingungen sowie die Vergleichsgrenze d_R . Bei vergleichbarer statistischer Sicherheit ändert sich somit ausschließlich die anzusetzende Standardabweichung nach (9.3). Die anzusetzende Vergleichsstandardabweichung σ_R ist in diesem Zusammenhang die Summe aus Wiederholstandardabweichung σ_r und σ_L (Prüfstellenstandardabweichung).

$$(\sigma_R)^2 = (\sigma_L)^2 + (\sigma_r)^2 \quad (9.3)$$

Mit

σ_R : Vergleichsstandardabweichung
(quadriert \triangleq Vergleichsvarianz)

σ_r : Wiederholstandardabweichung
(quadriert \triangleq Wiederholvarianz)

σ_L : Prüfstellenstandardabweichung
(quadriert \triangleq Prüfstellenvarianz)

9.2 Messgrößen und Messtechnik

Gemäß DIN Nr. 1319-1, 1995 wird die Messunsicherheit als Maß für die Genauigkeit der Messung einer Größe definiert, wobei der wahre Wert der Messgröße unbekannt ist und näherungsweise durch einen Schätzwert ermittelt wird. Es handelt sich bei der Messunsicherheit somit um einen Wertebereich, welcher voraussichtlich den wahren Wert der Messgröße beinhaltet.

Messunsicherheiten können bei der Durchführung einer Georadarmessung unter anderem bei den beiden wesentlichen direkten Messgrößen Signallaufzeit und Signalamplitude auftreten, welche als Grundlage für die spätere Dateninterpretation genutzt werden. Durch äußere Einflüsse, durch lokale Inhomogenität des Untersuchungsmediums oder durch lokale Strukturveränderungen an Grenzflächen können beide Messgrößen zufällig beeinflusst werden. Dadurch sind beide Messgrößen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, welche im Zuge der Datenauswertung und Dateninterpretation zu vereinzelt Abweichungen einerseits in der relativen Permittivität und andererseits in der Tiefe der jeweiligen Schichtgrenzen führen kann. Darüber hinaus führt das Fahrverhalten des Fahrzeugführenden zu zufällig auftretenden Abweichungen in der Messlinie.

Die vorhandenen Schichtgrenzen werden durch das Setzen von Picks in den der Grenzflächen im Radargramm nachvollzogen und interpretiert. Dieser Arbeitsschritt wird nach aktuellem Stand der Technik weitestgehend manuell durchgeführt, wodurch zufällige Abweichungen in den direkt zugeordneten Messgrößen entstehen können:

1. Lagekoordinate in y-Richtung aus Sample und Signallaufzeit t zwischen Sende- und Empfangsantenne
2. Lagekoordinate in x-Richtung aus Scan und Station im Radargramm
3. Amplitude und Polarisation des Picks in der zeitlichen Abfolge des Scans

Um diesen Einfluss näher zu untersuchen, wurden auf den drei definierten Messlinien der Objektebene jeweils drei Wiederholungsmessungen zur Bestimmung der zufälligen Abweichungen durchgeführt. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf der Signallaufzeit als Messgröße, da der horizontale Lageparameter ausschließlich aus der Scannummer bzw. Station im Radargramm bestand und die Amplitude

und Polarisation durch die Pickparameter vorgegeben waren. Beide Parameter liefern daher keine quantitative Messgröße, sondern dienen ausschließlich der Verortung der Picks im Radargramm.

Als Datengrundlage wurden die mit der Auswertemethode „kalibriert_default_Value“ ermittelten Messdaten genutzt, wobei vom Grundsatz her kein Unterschied zu den gewonnenen unkalibrierten Georadar-Daten besteht, da durch eine Kalibrierung ein systematischer Fehler in der relativen Permittivität ϵ_r korrigiert wird. Dieser unterliegt der identischen Signallaufzeit t und führt ausschließlich zu einer Veränderung der Tiefe der Schichtgrenze respektive Reflexion und der im Radargramm gesetzten Picks. Die Signallaufzeit wird diesen Picks als Messdatum zugeordnet und stellt daher kein direkt bestimmtes Messdatum im eigentlichen Sinne dar. Darüber hinaus unterliegt die Modellaufstellung der Prämisse, dass identische Versuchsbedingungen vorherrschen. Dies ist im vorliegenden Anwendungsfall erfüllt, da sowohl die Georadmessung auf der Versuchsstrecke, als auch die darauffolgende Durchführung des Post-Processings unter gleichbleibenden Bedingungen erfolgten. Es gilt also der Grundsatz, dass die Messgröße unter konstanten Bedingungen anhand von unabhängigen Versuchen direkt gemessen und ermittelt wurde.

Die Modellaufstellung kann somit nach (9.4) erfolgen:

$$Y = X_1 - X_2 \quad (9.4)$$

Mit

Y: Messgröße (hier: Signallaufzeit t in ns)

X_1 : unberichtigtes Messergebnis

X_2 : systematische Messabweichung zur Berichtigung des Messergebnisses

Per Definition beruht die systematische Messabweichung auf einer bekannten und einer unbekannt systematischen Messabweichung. Sind die Messwerte unter Wiederholungsbedingungen gewonnen worden, sodass alle potenziellen Einflussgrößen, welche zu einer systematischen Messabweichung führen könnten, gleich bleiben, so kann diese nicht ermittelt werden [DIN 1319-1:1995]. Wie in Kapitel 9.1 dargelegt, werden die Messdaten einer Georadmessung im Regelfall unter Wiederholbedingungen gewonnen, sodass der Faktor X_2 des Berechnungsmodells nach (9.4) zu vernachlässigen ist. Somit unterliegt die Messgröße der Signallaufzeit t

keiner Messabweichung, sondern ausschließlich einer Messunsicherheit, welche als zufälliger Fehler zu definieren ist.

Im Zuge der Quantifizierung der Messunsicherheit der Signallaufzeit erfolgte die Auswertung auf Basis der Schichtgrenze als Unterscheidungskriterium. Es liegen somit insgesamt vier Fallunterscheidungen vor, wobei keine Unterscheidung hinsichtlich der Belastungsklasse in der Auswertung vorgenommen wurde. Die zufällige Abweichung wurde an dieser Stelle aufgrund der geringen Grundgesamtheit von $n = 3$ Werten ausschließlich anhand einer stationsgetreuen Minimal- und Maximalwertbetrachtung nach (9.5) ermittelt.

$$R = t_{\max} - t_{\min} \quad (9.5)$$

Mit

R: Spannweite der Signallaufzeit einer Station in ns

t_{\max} : maximale Signallaufzeit einer Station in ns

t_{\min} : minimale Signallaufzeit einer Station in ns

Unter Wiederholungsbedingungen drückt die Spannweite R die maximale Wertespanne aus, in denen sich die auftretenden Abweichungen beim Picken einer Station bewegen. Vor dem Hintergrund der späteren Anwendung ist es vorstellbar, dass eine Erstmessung durch eine zusätzliche spätere Kontrollmessung überprüft werden könnte, wenn Zweifel an der Richtigkeit der ersten Messergebnisse vorliegen.

Neben der vorgenannten Unterscheidung zwischen den Schichtgrenzen wird in Auswertung der erwartbaren Abweichungen in der Signallaufzeit bei Wiederholungsmessungen zusätzlich zwischen der Messlinie der Versuchsstrecke sowie der Scanrate in Scans/m unterschieden. Die Tabelle 25 stellt in diesem Zusammenhang die maximalen Spannweiten der Wiederholungsmessungen dar, wobei in Anlehnung an die Analyse der Abweichungen in der Wiedergabe von Schichtgrenzen (Kapitel 8.1.2) und die Studie zur Quantifizierung der relativen Permittivität (Kapitel 8.1.3), alle Messwerte der Messlinien in die Auswertung einbezogen wurden. Hierbei gilt es die spezifischen Voraussetzungen für das Picken der Schichtgrenzen der genutzten Softwarelösung zu berücksichtigen.

Im Bereich der Asphaltdeckschicht liegen die stationsgetreuen maximalen Spannweiten der Signal-

laufzeit zwischen 0,21 ns (Messlinie 2, Scanrate 50 Scans/m) und 0,46 ns (Messlinie 1, Scanrate 10 Scans/m). In der darunterliegenden Schichtgrenze zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht erhöht sich die maximale Spannweite, mit Ausnahme der Scanraten 10 Scans/m und 20 Scans/m in der Messlinie 1. Die maximalen Spannweiten liegen bei dieser Schichtgrenze zwischen 0,28 ns (Messlinie 1, Scanrate 10 Scans/m) und 0,70 ns (Messlinie 2, Scanrate 20 Scans/m). Im Bereich der Schichtgrenze der zweilagigen Asphalttragschicht (nur Belastungsklasse Bk100) liegen die maximalen Spannweiten auf einem vergleichbaren Niveau. So betragen die Spannweiten 0,33 ns (Messlinie 1, Scanrate 20 Scans/m) bis 0,66 ns (Messlinie 3, Scanrate 100 Scans/m). Die Asphaltgrenze weist insgesamt die größten Spannweiten auf, welche sich darüber hinaus erheblich von den Spannweiten der weiteren Schichtgrenzen unterscheiden. So betragen diese 0,38 ns (Messlinie 2, Scanrate 20 Scans/m) bis 2,27 ns (Messlinie 2, Scanrate 10 Scans/m).

Unter Berücksichtigung der Größenordnung der Signallaufzeiten, welche den einzelnen Picks der Schichtgrenzen als Messgröße zugeordnet sind, sind die in Tabelle 25 aufgeführten stationsgetreuen Spannweiten als erheblich einzustufen. Vor dem Hintergrund einer Relativbetrachtung zwischen der maximalen Spannweite der Signallaufzeiten und

der eigentlichen Größe der Signallaufzeiten, welche anhand der Tiefe der Schichtgrenze und dem elektromagnetischen Eigenschaftsprofil festgestellt wurde, zeigen sich Messunsicherheiten durch das wiederholte Picken. Im Bereich der Asphaltdeckschicht liegt die Signallaufzeit näherungsweise zwischen 0,40 ns (Belastungsklasse Bk3,2) und 0,80 ns (Belastungsklasse Bk100). Die festgestellten maximalen Spannweiten der Wiederholungsmessungen zeigen, dass stationsgetreu Abweichungen von ca. 25,0 % ($R = 0,21$ ns bezogen auf 0,80 ns) durch das Picken erzeugt wurden.

Im Bereich der Schichtgrenze zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht sowie der Schichtgrenze innerhalb der zweilagigen Asphalttragschicht reduziert sich dieses Verhältnis, da die Spannweiten ein nahezu konstantes Niveau bei gleichzeitiger Zunahme der Signallaufzeit aufweisen. Im Bereich der Asphaltgrenze zeigen sich hingegen erhebliche Spannweiten der Signallaufzeiten. Diese sind vor allem der Scanrate 10 Scans/m zuzuordnen, welche in der Messlinie 1 eine maximale Spannweite von 1,77 ns, in der Messlinie 2 von 2,27 ns und in der Messlinie 3 von 1,03 ns aufweisen. In Bezug auf die gängigen Literaturwerte für die relative Permittivität ϵ_r zwischen 5 und 9 resultieren dadurch nach (3.8) und (3.17) Abweichungen in der Tiefe der Schichtgrenze zwischen 11,35 und 15,23 cm. Diese Abweichungen sind aus-

Messlinie (ML) der Versuchsstrecke	Scanrate in Scans/m	Maximale Spannweite R der Signallaufzeit in ns			
		Schichtgrenze Asphaltdeck- und Asphaltbinder-schicht	Schichtgrenze Asphaltbinder- und Asphalttrag-schicht	Schichtgrenze innerhalb der Asphalttragschicht (nur Bk100)	Asphaltgrenze
ML1	10	0,46	0,28	0,51	1,77
	20	0,40	0,31	0,33	1,17
	50	0,31	0,40	0,45	0,66
	100	0,35	0,40	0,63	0,84
ML2	10	0,33	0,38	0,56	2,27
	20	0,27	0,70	0,40	0,38
	50	0,21	0,52	0,52	0,59
	100	0,26	0,52	0,56	0,59
ML3	10	0,39	0,52	0,38	1,03
	20	0,24	0,41	0,59	0,49
	50	0,22	0,56	0,52	0,63
	100	0,23	0,52	0,66	0,77

Tab. 25: Maximale Spannweiten der Signallaufzeit beim wiederholten Picken der Schichtgrenzen im Konstruktionsaufbau der Objektebene

schließlich durch eine zusätzliche Schicht im Konstruktionsaufbau, einer lokalen Substanzschädigung oder einem Substanzmerkmal zu erklären.

Der Vergleich der Scanraten zeigt, dass mit zunehmender Tiefe der Schichtgrenze die Unterschiede in den maximalen Spannweiten der Scanraten ebenfalls zunehmen, wobei dies der grundsätzlichen Zunahme der maximalen Spannweiten geschuldet ist. So variieren im Bereich der Schichtgrenze zwischen der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht die maximalen Wertespanssen zwischen 0,12 ns (Messlinie 2) und 0,17 ns (Messlinie 3). Im Bereich der Schichtgrenze zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht sowie innerhalb der zweilagigen Asphalttragschicht zeigt sich ein relativ konstantes Niveau. So variieren die maximalen Spannweiten zwischen 0,12 ns und 0,32 ns. Im Bereich der Asphaltgrenze wurden die größten Unterschiede zwischen den Scanraten festgestellt. Diese betragen in der Messlinie 1 1,11 ns (Scanraten 10 Scans/m und 50 Scans/m), in der Messlinie 2 1,89 ns (Scanraten 10 Scans/m und 20 Scans/m) sowie in der Messlinie 3 0,54 ns (Scanraten 10 Scans/m und 20 Scans/m).

Bei der Auswertung der maximalen Spannweiten der Signallaufzeiten kann mittels einer Zuordnung der Stationierung eine Ursache für die erheblichen Abweichungen ermittelt werden. Zum einen wird ersichtlich, dass die erheblichen Abweichungen im

Wesentlichen den bautechnisch markanten Bereichen aus Baulosanfang, Baulosende und Aufbauwechsel zuzuordnen sind. Dies ist insofern naheliegend, da bereits in diesen Bereichen erhebliche Abweichungen in der Tiefe der Schichtgrenze im Vergleich zu den entnommenen Bohrkernen sowie in der Berechnung der relativen Permittivitäten festgestellt wurden. Darüber hinaus waren die lokal festgestellten Abweichungen auf Unterschiede in den im Radargramm gesetzten Picks zurückzuführen. Gemäß des rechnerischen Zusammenhangs nach (3.8) und (3.17) zeigt sich, dass die in den entsprechenden Kapiteln 8.1.2 und 8.1.3 dargelegten Abweichungen in der Wiedergabe der Tiefen von Schichtgrenzen sowie in der Größe der relativen Permittivität unter anderem auf die Unterschiede in der Signallaufzeit zurückzuführen waren. In Anlehnung an den in diesen Auswertungen gewählten datenseitigen Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche ergeben sich die in Tabelle 26 dargelegten angepassten maximalen Spannweiten.

Es zeigt sich, dass durch den datenseitigen Ausschluss eine erhebliche Reduzierung der maximalen Spannweite im Bereich der Asphaltgrenze erzielt wird. Die maximalen Spannweiten der Signallaufzeit betragen stationsgetreu bis zu 0,89 ns (Messlinie 2, Scanrate 100 Scans/m). Die Unterschiede der maximalen Spannweiten der Signallaufzeit innerhalb der einzelnen Messlinien wurden

Messlinie (ML) der Versuchsstrecke	Scanrate in Scans/m	Maximale Spannweite R der Signallaufzeit in ns			
		Schichtgrenze Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht	Schichtgrenze Asphaltbinder- und Asphalttragschicht	Schichtgrenze innerhalb der Asphalttragschicht (nur Bk100)	Asphaltgrenze
ML1	10	0,46	0,28	0,51	0,38
	20	0,40	0,31	0,33	0,28
	50	0,31	0,36	0,45	0,66
	100	0,35	0,40	0,63	0,84
ML2	10	0,33	0,36	0,35	0,33
	20	0,27	0,70	0,40	0,38
	50	0,21	0,52	0,52	0,59
	100	0,25	0,52	0,56	0,89
ML3	10	0,39	0,52	0,38	0,61
	20	0,21	0,41	0,59	0,49
	50	0,22	0,56	0,52	0,63
	100	0,23	0,52	0,66	0,77

Tab. 26: Maximale Spannweiten der Signallaufzeit beim wiederholten Picken der Schichtgrenzen im Konstruktionsaufbau der Objektebene unter Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche

für die Asphaltgrenze durch den datenseitigen Ausschluss ebenfalls erheblich reduziert.

In den darüber liegenden Schichtgrenzen des gebundenen Oberbaus sind nur marginale Veränderungen in den Spannweiten durch die datenseitige Anpassung zu erkennen. Dies legt den Schluss nahe, dass die erheblichen Abweichungen in der Signallaufzeit bei einer einzelnen Wiederholungsmessung lokal auftreten und ausschließlich durch vereinzelte Pickfehler im Radargramm zu erklären sind. Dies kann durch eine Datenlücke oder durch eine Abfolge von mehreren Picks mit erheblich abweichender Signallaufzeit hervorgerufen worden sein. In jedem Fall handelt es sich nicht um eine systematische, sondern um eine zufällige Abweichung, welche dem manuellen Picken der Schichtgrenzen geschuldet ist. Die Signallaufzeit unterliegt demnach in erster Linie einer Messunsicherheit, welche keinesfalls einen systematischen Charakter beinhaltet. Vielmehr handelt es sich um eine zufällige Messunsicherheit, welche im vorliegenden Anwendungsfall durch die nachfolgenden Maximalwerte quantifizierbar ist:

- 0,20 bis 0,40 ns im Bereich der Asphaltdeckschicht.
- 0,30 bis 0,60 ns im Bereich der Asphaltbinderschicht.

- 0,30 bis 0,70 ns im Bereich der Asphalttragschicht.

- 0,30 bis 0,90 ns im Bereich der Asphaltgrenze.

Gleichermaßen zeigen die mittleren Spannweiten der Signallaufzeit in diesem Zusammenhang, dass es sich bei den vorgenannten maximalen Spannweiten um lokale Peaks und weniger um systematische und daher erwartbare Abweichungen handelt. Im Mittel liegen die Werte der Spannweiten unter Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche und unabhängig der Messlinie, Scanrate und Schichtgrenze zwischen 0,05 ns und 0,14 ns (Tabelle 27).

Neben Messunsicherheiten sind bei der Datengewinnung und -verarbeitung Messabweichungen zu berücksichtigen, welche allgemein als der Abstand des wahren Wertes einer Messgröße von dem dazugehörigen Schätzwert aus einer Berechnung oder einer Messung definiert wird. Diese setzt sich aus einer zufälligen und einer systematischen Messabweichung zusammen, wobei die zufällige Messabweichung mit der vorgenannten Messunsicherheit korreliert und sich infolge des unbekanntem wahren Wertes der Messgröße nicht exakt bestimmen lässt [DIN Nr. 1319-1, 1995]. Die systematische Abweichung setzt sich in diesem Zusammenhang ebenfalls aus einer bekannten und einer un-

Messlinie (ML) der Versuchsstrecke	Scanrate in Scans/m	Mittlere Spannweite R der Signallaufzeit in ns			
		Schichtgrenze Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht	Schichtgrenze Asphaltbinder- und Asphalttragschicht	Schichtgrenze innerhalb der Asphalttragschicht (nur Bk100)	Asphaltgrenze
ML1	10	0,09	0,07	0,12	0,08
	20	0,07	0,06	0,08	0,08
	50	0,06	0,06	0,08	0,11
	100	0,05	0,05	0,09	0,12
ML2	10	0,09	0,07	0,10	0,07
	20	0,07	0,08	0,10	0,08
	50	0,07	0,08	0,10	0,09
	100	0,07	0,05	0,12	0,14
ML3	10	0,12	0,08	0,09	0,10
	20	0,07	0,07	0,12	0,09
	50	0,07	0,07	0,08	0,09
	100	0,07	0,06	0,12	0,09

Tab. 27: Mittlere Spannweiten der Signallaufzeit beim wiederholten Picken der Schichtgrenzen im Konstruktionsaufbau der Objektebene unter Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche

bekannten Abweichung zusammen. Unbekannte systematische Abweichungen sind per Definition nicht immer von zufälligen Abweichungen zu trennen, da deren Herkunft nicht konkret festgestellt werden kann und diese daher für zufällig auftretende Phänomene gehalten werden können. Bekannte systematische Abweichungen hingegen sind konkret auf definierte Eingangsgrößen zurückzuführen und können daher durch Korrektur, wie zum Beispiel Kalibrierungen, Justierungen oder Korrekturfaktoren, behoben werden. Im vorliegenden Anwendungsfall sind diesbezüglich eine Vielzahl an Eingangsgrößen in der Messtechnik und den Messeinstellungen feststellbar, welche einen systematischen Einfluss auf das Messergebnis haben können:

- Im Zuge des Aufbaus des Messsystems gibt es konkrete Montagevorgaben hinsichtlich der einzuhaltenden Abstände zwischen Antennensystem und Messfahrzeug sowie zwischen Antennensystem und Straßenoberfläche. Ferner hat der Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne maßgeblichen Einfluss auf die Signallaufzeit. Hinsichtlich der Montage sollten die Antennen möglichst 100,0 cm weit von Metallteilen des Messfahrzeugs entfernt angeordnet werden, um zusätzliche Reflexionen durch Abstrahlung an den Metalloberflächen zu vermeiden. Der Abstand der Antennenunterkante zur Straßenoberfläche sollte mindestens 50,0 cm betragen.
- Das Fahrverhalten und der Fahrweg des Messfahrzeugs können bei Sperrungen oder Umfahrungen, zum Beispiel in Baustellenbereichen, zu längeren Abweichungen in der Messlinie führen. Diese sind dann als systematische Abweichungen im Messprotokoll sowie in den Messdaten durch Markierungspunkte zu vermerken. Sofern es sich nur um vereinzelte Abweichungen aus dem Fahrverhalten handelt, sind diese als zufällige Abweichungen zu deklarieren und als Messunsicherheit der Messgrößen zu behandeln.
- Die unterschiedliche Festlegung von messtechnischen Eingangsgrößen kann zu systematischen Abweichungen in den Messdaten führen. In diesem Zusammenhang sind folgende Eingangsgrößen von Bedeutung:
 - Messfrequenz der genutzten Antennen in MHz
 - Scanrate in Scans/m
 - Anzahl der Samples je Scan

- Transmitterrate als Wiederholfrequenz der abgestrahlten Impulse
- Vorgabe von Filter- und Verstärkungsfunktionen
- Kalibrierung der Antennengeometrie zur Einführung des Bezugshorizontes
- Kalibrierung des Wegaufnehmers zur Kontrolle der Stationierung der Messdaten

Sofern eine erneute Messung mit einer abweichenden Messtechnik vorgenommen wird sind beide Messungen unter Vergleichsbedingungen zu bewerten. Diese unterliegen der Beeinflussung systematischer Messabweichungen, welche sich aus den vorgenannten Einflussgrößen zu der eingesetzten Messtechnik sowie Softwarelösung ergeben. Dieses Vorgehen ist im vorliegenden Anwendungsfall nicht zu bewerten, da ausschließlich eine Messtechnik mit entsprechender Softwarelösung verwendet wurde.

9.3 Softwarebedingte Messabweichungen

Neben den in Kapitel 9.2 dargelegten Messunsicherheiten und Messabweichungen der messtechnischen Eingangsgrößen und der Messtechnik resultieren weitere mögliche Messabweichungen aus den Einstellungsparametern der im vorliegenden Anwendungsfall genutzten Softwarelösung. Dies betrifft in erster Linie die Interpretation der Radargramme, welche durch das manuelle Picken der Schichtgrenzen vorgenommen wurde. Hierbei unterlag das manuelle Setzen der Picks vorgegebenen Suchparametern in horizontaler und vertikaler Ausrichtung, um eine chaotische Interpretation im Radargramm zu vermeiden. Dazu zählten die nachfolgend aufgeführten Parameter:

- Search Width: Anzahl an Scans, welche durch den Cursor abgesehen werden, um einen Datenpunkt zu setzen (horizontale Suchfunktion).
- Single Point Search Length: Zulässige Entfernung zwischen der Cursorposition und einem Peak in der zeitlichen Abfolge eines Scans, um den Datenpunkt zu setzen (i. d. R. Nutzung des zur Cursorposition nächstgelegenen Peak) (vertikale Suchfunktion).
- Datenpunkt Polarity: Vorgabe der Amplitudenpolarisation, um einen Peak zu definieren (positiv, negativ oder absolut).

Durch diese Vorgaben der Softwarelösung entstehen Abweichungen hinsichtlich der Cursorposition bei der Interpretation der Schichtgrenzen im Radarogramm. Die Abweichungen resultieren aus der Diskrepanz zwischen der durch das auswertende Personal festgelegten Position eines Picks und der späteren tatsächlichen Lage eines Picks.

Weiterhin entstehen im Zuge des Exports der Messdaten Abweichungen in der Angabe der Tiefe der Schichtgrenzen, sofern ein Stationierungsraster festgelegt wurde, in dem die Messdaten ausgegeben werden sollen. Es bietet sich an, dieses Stationierungsraster auf einen Meter festzulegen, wodurch einerseits ein konstantes Datenraster über die gesamte Länge eines Untersuchungsabschnitts gewährleistet und andererseits eine ausreichende Genauigkeit in der Wiedergabe des Verlaufs der Schichtgrenzen erzielt wird. Da die im Radarogramm gesetzten Picks zur Interpretation der Schichtgrenzen in der Regel nicht mit dem im Export definierten Stationierungsraster übereinstimmen, werden die zu exportierenden Messpunkte als Zwischenpunkte auf das Stationierungsraster projiziert. Sofern innerhalb eines Distanzintervalls keine Datenpunkte gesetzt wurden, entstehen Datenlücken, welche nachträglich entweder durch erneutes Picken oder durch lineare Interpolationen zwischen den exportierten Messdaten zu schließen sind. Die Genauigkeit der exportierten Messwerte wird dementsprechend maßgeblich von der Qualität und Quantität der im Radarogramm gesetzten Picks beeinflusst. Darüber hinaus führt die Projektion der Messdaten auf die interpolierten Zwischenpunkte zu Abweichungen der eigentlichen Tiefe der Schichtgrenze an der betroffenen Station. In der Regel wird dabei das arithmetische Mittel angesetzt, sodass der exportierte Datensatz nur näherungsweise die tatsächliche Tiefe der Schichtgrenze an der jeweiligen Station wiedergibt.

9.4 Verortungsfehler von Messdaten

Im Zuge der Durchführung von Georadarmessungen können systematische Abweichungen durch Fehler in der Verortung der Messdaten entstehen. Auf der Objektebene wurden im vorliegenden Anwendungsfall Stabstähle in die Schottertragschicht eingebettet, um stationäre Start- und Endpunkte zu schaffen. Dies ist auf den realen Praxisfall insofern übertragbar, wenn Brückenbauwerke Bestandteil des Untersuchungsabschnitts sind. Entsprechende

Brückenübergänge zeigen durch die vergleichbare Metallstruktur ähnliche Signalcharakteristika in Form von Diffraktionshyperbeln im Radarogramm, wobei die Tiefe entsprechend abweicht. Ist die Nutzung entsprechender Fixpunkte nicht möglich, so ist ein Einmessen in der Örtlichkeit notwendig. Es bietet sich dabei an, die Stationierung im Radarogramm an die Betriebskilometrierung der Untersuchungsstrecke anzupassen. Da es sich in der Regel um einen fliegenden Start handelt, ist die Verortung durch das Setzen von Markern im Radarogramm anzustreben. Dabei besteht das Risiko, dass ein entsprechender Startpunkt, welcher mit einem markanten Fixpunkt in der Örtlichkeit korreliert, aufgrund der Messgeschwindigkeit von bis zu 80,0 km/h nicht exakt getroffen wird. Somit besteht das Risiko eines Versatzes zwischen Startpunkt im Radarogramm und Startpunkt in der Örtlichkeit.

Darüber hinaus ist bei dem Einsatz eines Encoders am Fahrzeug vor jeder Messung eine Kalibrierung durchzuführen, um die Genauigkeit der Wegaufnahme zu überprüfen. Anhand von durchgeführten Messungen liegt die Ungenauigkeit des Wegaufnehmers im vorliegenden Anwendungsfall bei $1 \times 10^{-5} \%$ und stellt somit nur eine geringe systematische Abweichung in den aufgenommenen Messdaten dar.

Von größerer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang das Fahrverhalten und der Fahrweg des Messfahrzeuges einzuschätzen. Bei vereinzelt Abweichungen handelt es sich hierbei um zufällige Abweichungen, welche als Messunsicherheit der Stationierung zu behandeln sind und zu Abweichungen in der Verortung der Messdaten führen. Bei längeren Sperrungen oder Umfahrungen, zum Beispiel in Baustellenbereichen, handelt es um erhebliche Veränderungen in der Länge der Messlinie und in den Messdaten. Die entsprechenden Bereiche sind zu protokollieren sowie im Rahmen der Datenauswertung zu berücksichtigen und gegebenenfalls datenseitig auszuschließen.

Neben der Abweichungen aus der Messtechnik und dem Fahrweg resultiert eine weitere Abweichung aus dem Einfluss der Streckencharakteristik des Untersuchungsabschnitts auf die Länge der Georadarmessung. Diese ist als unvermeidbare Abweichung zu charakterisieren, welche die Messlänge fahrstreifenbezogen durch Kurvenfahren verändert, wodurch Abweichungen in der Stationierung in dem entsprechenden Radarogramm auftreten. Die Bezugsgröße der Georadarmessung sollte außerorts

die Betriebskilometrierung der Bundesfernstraße sein, welche sich in der Regel auf die Mittelachse des Querschnittes bezieht. Dies führt im Rahmen der fahrstreifenbezogenen Georadarmessung zu Abweichungen der Stationierung in der Messlinie und damit im Radargramm. Die entsprechenden Unterschiede sind vor allem vor dem Hintergrund der Verortung von Bohrkernentnahmestellen, welche zweckmäßigerweise anhand der Betriebskilometrierung erfolgt, bei der Stationierungsangabe zu berücksichtigen.

Bei Verwendung eines GNSS anstelle eines Encoders besteht das Risiko der unzureichenden Funkübertragung von der Position und der Uhrzeit des Messfahrzeuges. Dadurch kann die dreidimensionale oder zweidimensionale Positionsbestimmung beeinträchtigt werden, sodass die Verortung der Messdaten fehlerbehaftet ist. Darüber hinaus besteht bei topografisch anspruchsvollen Verhältnissen das Risiko der eingeschränkten Funkübertragung, welches ebenfalls zu Abweichungen in der Positionsbestimmung des Messfahrzeuges führen kann. Die Genauigkeit der aktuell verfügbaren GNSS unterliegt den nachfolgenden möglichen Unsicherheiten und Abweichungen [SCHÜTTLER, 2014]:

- Geometriefehler der Satelliten durch unzureichende relative Positionierungen untereinander
- Signalabschattung durch fehlende Sichtverbindung zu einem oder mehreren Satelliten
- Brechung und Dämpfung des Satellitensignals in der Ionosphäre in Abhängigkeit von der Wetterlage
- Signalreflexion aufgrund topografischer Verhältnisse oder bebauter Strukturen

Vor dem Hintergrund der Entnahme von Bohrkernen zur Kalibrierung der Georadar-Daten und direkten Ansprache der Straßensubstanz ist zudem ein lateraler Versatz zwischen der tatsächlichen Entnahmestelle und der Messlinie des Georadars zu berücksichtigen. Hintergrund sind die zumeist in den Rollspuren des jeweiligen Fahrstreifens verorteten Messlinien. Zur Aufrechterhaltung des Fahrkomforts und der Verkehrssicherheit sollte im Bereich der Rollspur allerdings keine Beprobung durchgeführt werden. Die Bohrkernentnahmestelle ist vielmehr in Fahrstreifenmitte zwischen den Rollspuren vorzusehen, sodass der laterale Versatz je nach Ausprägung der Rollspuren und entsprechen-

der Verdrückungen an der Straßenoberfläche maximal 30,0 bis 60,0 cm beträgt.

9.5 Äußere Störeinflüsse

Unter äußeren Störeinflüssen lassen sich sämtliche Faktoren zusammenfassen, welche zu Veränderungen in der Signalstärke, in der Signallaufzeit oder in den Amplituden im O-Scope während einer Georadarmessung führen. Die FGSV hat in dem entsprechenden Arbeitspapier Nr. 443A diese Einflussgrößen aufgegriffen, deren Effekt im Signal sowie mögliche Gegenmaßnahmen dargestellt. Dabei wird grundlegend zwischen Umweltfaktoren, materialbedingten Faktoren sowie sonstigen Umgebungsfaktoren unterschieden.

- Umweltfaktoren:
 - Temperatur der Luft und der Oberfläche
 - Feuchtegehalt
 - Salze und Chloride
 - Zusätzliche Funksignale als elektromagnetische Störquellen (vor allem bei dem Einsatz von luftgekoppelten Antennensystemen)
- Materialbedingte Faktoren:
 - Lokale Inhomogenität
 - Elektrisch leitfähige Bestandteile, wie Schlacken und metallhaltige Verbundbaustoffe
- Sonstige Umgebungsfaktoren:
 - Zusatzreflexionen durch angrenzende metallische Bauteile, wie zum Beispiel Fahrzeugrückhaltesysteme
 - Zusatzreflexionen durch vorbeifahrenden Verkehr (vorwiegend durch Vorbeifahrten von LKW verursacht) (Bild 57)

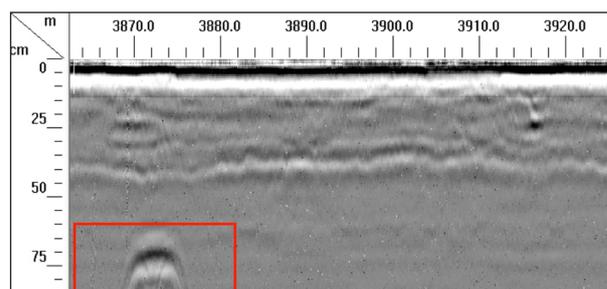


Bild 57: Zusatzreflexion im Radargramm durch einen vorbeifahrenden LKW – in der in Fahrtrichtung links montierten 1 GHz Antenne

9.6 Messunsicherheiten und Abweichungen aus der Probennahme

9.6.1 Entnahme von Bohrkernen

Bei Georadarmessungen dienen Bohrkern als Referenzpunkte für die Ermittlung des tatsächlichen Konstruktionsaufbaus an einer bestimmten Station innerhalb eines Untersuchungsabschnitts. Durch die direkte Ansprache der Straßensubstanz werden die örtlichen Verhältnisse ermittelt und als Kalibrierungsgrundlage für die dazugehörigen Messdaten des Georadars herangezogen. Die Entnahme der Bohrkern erfolgt gemäß den TP Asphalt-StB – Teil 27.

Am Bohrkern werden im Zuge der labortechnischen Ansprache direkt die Tiefen von Schichtgrenzen bestimmt (Kapitel 9.6.2) sowie der gegebenenfalls nicht vorhandene Schichtenverbund ermittelt. Letzterer resultiert entweder augenscheinlich aus der fehlenden Haftung zweier Schichten, sodass der Bohrkern mehrteilig aus dem Bohrloch entnommen werden muss (Bild 58) oder anhand der Bestimmung einer unzureichenden aufnehmbaren Scherkraft in der Schichtgrenze.

Bei der Probennahme ist grundsätzlich die Oberflächenbefestigung vollständig zu erbohren und aufzunehmen. Dies wird im Zuge der Bohrkernentnahme durch Aufschwimmen von ungebundenem Material aus den vorhandenen ungebundenen Trag-schichten oder dem anstehenden Boden und den damit verbundenen Verfärbungen im Bohrschlamm ersichtlich.

Ist der gebundene Oberbau nicht vollständig erbohrt und der Bohrkern wird entnommen, besteht das Risiko der Bohrkernbeschädigung durch Korn-



Bild 58: Bohrkern der Objektebene ohne Schichtenverbund zwischen Asphaltbinder- und Asphalttragschicht

ausbrüche an der Unterseite des Bohrkerns. Dadurch sind die Gesamtdicke des Asphaltoberbaus und die Dicke der einzelnen Schichten im Zuge der Schichtdickenmessung nicht mehr exakt bestimmbar, da entsprechende Bruchstücke etc. im Bohrloch verbleiben. Es besteht die Notwendigkeit der Entnahme eines zusätzlichen Bohrkerns.

9.6.2 Schichtdickenmessung am Bohrkern

Die Bestimmung von Schichttiefen am Bohrkern wird gemäß den TP D-StB durchgeführt und erfolgt mittels einer kumulativen Messung der Schichtgrenzen entlang der Längsachse des Bohrkerns. Die Asphaltdeckschicht fungiert in diesem Zusammenhang als oberste Schicht und Ausgangspunkt der Messung. Die Schichtgrenzen werden mittels Stahl-lineal der Genauigkeit $\pm 0,5$ mm gemessen, wobei auf angezeichnete Markierungslinien in den Schichtgrenzen und als Messraster zurückgegriffen wird.

Die Tiefe jeder Schichtgrenze wird an vier gleichmäßig über den Bohrkernumfang verteilten Markierungslinien ermittelt. Die tatsächliche Schichttiefe wird durch den arithmetischen Mittelwert der vier Einzelwerte berechnet, wobei die abschließende Dicke jeder Schicht durch Subtraktion der höherliegenden Schichten ermittelt wird. Die Einzelwerte sind in diesem Zusammenhang mittels Stahl-lineal oder Tiefenmessschieber auf 1,0 mm Genauigkeit anzugeben. Für die Schichtdickenermittlung sind ausschließlich Bohrkern zugelassen, die sämtlich vorhandenen und für die Messung relevanten Schichten vollständig erfassen und deren Unterseite bei der Entnahme nicht verändert wurde (Bild 59). Dadurch wird die Schichtdickenermittlung an unvollständig erbohrten Bohrkernen vermieden.

Als problematisch ist in diesem Zusammenhang der raue und ungleichmäßige Verlauf der Bohrkernunterseite zu bewerten (Bild 60), welcher aus dem Übergang vom gebundenen zum ungebundenen Oberbau resultiert. Der ungleichmäßige Verlauf erschwert eine adäquate Wahl der Markierungslinien, welche Voraussetzung für eine gute Näherung der Schichtdicke der untersten Schicht sowie für die Bestimmung der Gesamtdicke des Asphaltoberbaus sind.

Darüber hinaus ist das manuelle Vorgehen in der Bestimmung von Schichtdicken eine Ursache für potenzielle Abweichungen in der Angabe der tatsächlichen Tiefe einzelner Schichtgrenzen. Dies ist der Fall, wenn die Schichtgrenzen nicht eindeutig

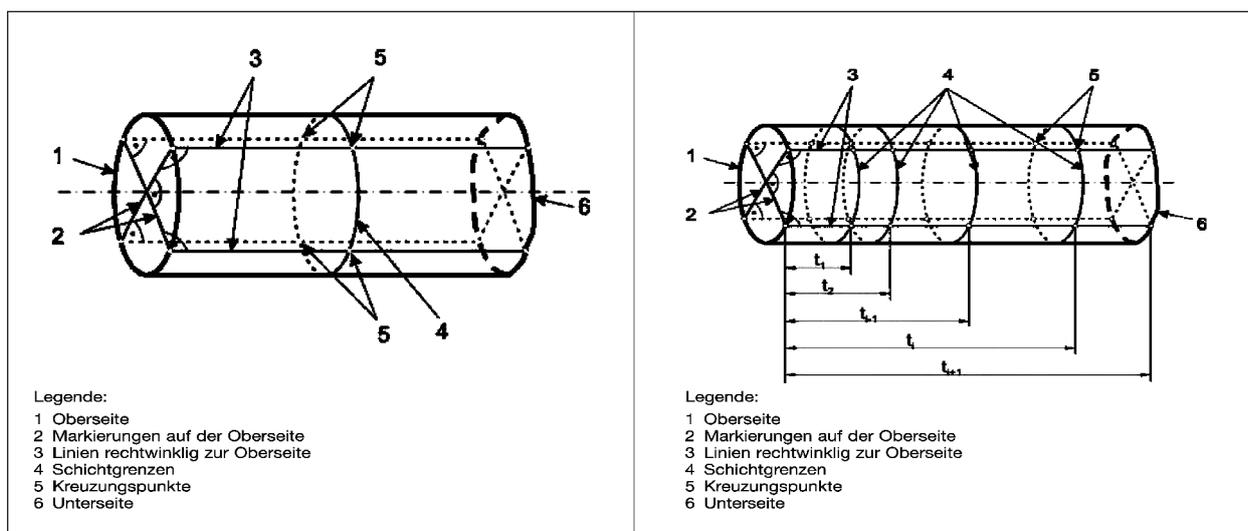


Bild 59: Markierungslinien (links) und Messschema (rechts) am Bohrkern gemäß TP D-StB



Bild 60: Bohrkern der Versuchsstrecke mit rauer und ungleichmäßiger Unterseite

am Bohrkern zu erkennen sind, da zum Beispiel der Materialkontrast benachbarter Schichten sehr gering ist. Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Schichtgrenze anhand eines arithmetischen Mittelwertes angegeben wird.

Gemäß dem technischen Regelwerk existiert keine Verfahrenspräzision im Sinne der nationalen technischen Prüfvorschriften bezüglich der zulässigen kritischen Spannweite für Einzelwerte in der Schicht-

dickenmessung. Die korrespondierende DIN EN Nr. 12697-36, 2003 umfasst an dieser Stelle in Anlehnung an die nationale TP Asphalt-StB Teil 0 „Statistische Grundlagen zur Auswertung der Untersuchungen, Schiedsuntersuchungen, Allgemeine Angaben zum Prüfbericht“ eine Wiederhol- und Vergleichspräzision. Demnach darf der Standardfehler der Wiederholpräzision bei $n = 10$ Messungen höchstens 1,2 mm und der Vergleichspräzision bei $n = 22$ Messungen höchstens 1,8 mm betragen.

10 Bewertung der Messdaten

10.1 Allgemeine Bewertung der Versuchsprogramme

Im vorliegenden Anwendungsfall wurden zwei Versuchsprogramme zur Eruiierung der Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen des Georadarverfahrens durchgeführt. Dabei diente das Versuchsprogramm der Objektebene der gezielten Detektion von Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen in der Straßensubstanz durch die Ableitung visuell feststellbarer Charakteristika im Radargramm und in den elektromagnetischen Parametern. Darüber hinaus wurden theoretisierte Betrachtungen hinsichtlich der potenziellen Genauigkeit des Verfahrens durchgeführt. Ferner wurde das Versuchsprogramm dazu genutzt, zweckmäßige Einstellungen von messtechnischen Größen zu definieren, um einerseits Substanzmerkmale und Substanzschädigungen und andererseits den Konstruktionsaufbau an sich möglichst optimal zu detektieren.

Die Objektebene enthielt hierzu eine Vielzahl an künstlich hergestellten Substanzschädigungen, um die grundsätzliche Möglichkeit der Erkennung durch das Georadarverfahren zu untersuchen. Die Art und Ausprägung der Schädigungen wurden in diesem Zusammenhang variiert, um eine breitere Basis hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen des Messverfahrens zu schaffen. Im Einzelnen zählten dazu:

- 1) Abweichende Charakteristik des Schichtenverbundes:
 - Absanden der Grenzfläche
 - Aufbringen eines geschlossenen Wasserfilms
 - Überfettung mit erhöhter Menge Bitumenemulsion
- 2) Einzelrisse:
 - Durchschlagend durch den gesamten gebundenen Oberbau mit Rissbreiten von 3,0 mm und 10,0 mm
 - Spezifisch in einzelnen Schichten des gebundenen Oberbaus mit Rissbreiten von 3,0 mm und 10,0 mm
- 3) Lokal vergrößerte Hohlräume in einzelnen Schichten des gebundenen Oberbaus in den Durchmessern 0,5, 1,0, 1,9 und 3,0 cm
- 4) Lokale Materialausbrüche und Störungen im Schichtenverlauf, durch die Überverdichtung einzelner Schichten im gebundenen Oberbau mittels erhöhter dynamischer Verdichtung
- 5) Typische Fremdmaterialien in Form von lokalen Nestern aus Schlacke, Schotter, Füllmaterial und Laub
- 6) Kunststoffleerrohre im Bereich der Frostschuttschicht mit dem Nenndurchmesser DN150

Neben der definierten Zielsetzung der Objektebene, inwieweit Substanzschädigungen grundsätzlich zu detektieren sind und wie sich diese in den Georadar-Daten darstellen, war es gleichermaßen das Ziel, anhand eines Variantenvergleichs zweckmäßige Quantifizierungen in Bezug auf messtechnischen Größen zu ermitteln. Dies diente der Feststellung, inwieweit und unter welchen Voraussetzungen die eingebrachten Substanzschädigungen erfasst werden konnten. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass es sich um bekannte Substanzschädigungen gehandelt hat, welche sowohl in ihrer Art

und Ausprägung, aber auch hinsichtlich der Verortung im Radargramm bekannt und entsprechend gut und schnell wiedererkennbar waren. Dies stellt nicht den Regelfall beim Einsatz des Georadarverfahrens dar, da die Straßensubstanz im Praxisfall eine unbekannte Größe darstellt, welche mit dem Georadar zu erfassen ist. Es handelte sich bei den Auswertungen somit vorrangig um theoretisierte Betrachtungen unter weitestgehend kontrollierten Umgebungsbedingungen, welche durch das ergänzende Versuchsprogramm der Netzebene auf den realen Praxisfall übertragen und validiert wurden.

Die Untersuchungen und Auswertungen der Messdaten auf Objektebene haben gezeigt, dass lokale Substanzschädigungen und Substanzmerkmale, welche quer zur Messrichtung verlaufen, durch Diffraktionshyperbeln gut zu erkennen sind, wobei auf die Festlegung der horizontalen Messeinstellungen zu achten ist. Diese sind zum Zeitpunkt der Messung durch die Wahl der Scanrate festzulegen, wobei die Auswertungen gezeigt haben, dass Scanraten ab 20 Scans/m ausreichende Ergebnisse geliefert haben. Sofern möglich, ist auch eine höhere Scanrate sinnvoll, wobei vielfach die Messgeschwindigkeit als zu hoch einzuschätzen ist, als das eine entsprechende Scanrate festgelegt werden kann. Nichtsdestotrotz ist eine höhere Scanrate mit einer höheren Datendichte verbunden, welches grundsätzlich als zweckmäßig einzustufen ist. In vertikaler Ausrichtung sollte gemäß der dargelegten Ergebnisse der Auswertungen zur ausreichenden Auflösung des gebundenen Oberbaus eine Messfrequenz $f > 1.000$ Mhz genutzt werden.

Substanzschädigungen und Substanzmerkmale, welche in Messrichtung des Georadars verlaufen, sind als weitestgehend unabhängig von der Festlegung technischer Eingangsgrößen einzuschätzen. So haben die Auswertungen gezeigt, dass die vier Scanraten des Versuchsprogramms wie erwartet vergleichbare Ergebnisse erzielen und ausschließlich die Datendichte variiert. Dies hat allerdings nur bedingt Einfluss auf das Messergebnis, da beispielsweise Schichtgrenzen fortlaufend im Radargramm in horizontaler Richtung abgebildet werden. Eine geschädigte Schichtgrenze ist visuell daher vorrangig durch Veränderungen im O-Scope und damit durch abweichende Wellenmuster in der betroffenen Schichtgrenze festzustellen. Im Zuge der Auswertung der O-Scopes mit und ohne vorhandenem Schichtenverbund konnte allerdings keine eindeutige Abgrenzung in Bezug auf Amplitudenver-

hältnisse in der Schichtgrenze festgestellt werden. Daher sind die festgestellten Auswertungsergebnisse vorrangig als Tendenzen zu verstehen, welche eine gewisse Sicherheit in Bezug auf die Feststellung von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen im Radargramm liefern, aber schlussendlich mit einer gewissen Restunsicherheit behaftet sind. Es ist daher zu empfehlen, dass für Fragestellungen, die sich mit der Feststellung von Substanzschädigungen befassen, in jedem Fall eine Beprobung des Untersuchungsabschnitts durchgeführt werden sollte. In Bezug auf die Feststellung von unzureichendem Schichtenverbund besteht dadurch beispielsweise die Möglichkeit, durch die Korrelation zwischen dem entnommenen Bohrkern, dem entsprechenden O-Scope und dem Radargramm selbst, Eingrenzungen von geschädigten Bereichen anhand der visuell feststellbaren Charakteristika vorzunehmen.

Eine quantitative Einschätzung der Auswertungen zu den elektromagnetischen Parametern Signallaufzeit t , Ausbreitungsgeschwindigkeit v sowie relativer Permittivität ϵ_r hat dahingehend keine systematischen Ergebnisse gezeigt, um beispielsweise unzureichenden Schichtenverbund empirisch festzustellen. Die Untersuchung hinsichtlich der Reflexions- und Transmissionskoeffizienten ließ keine direkte Ableitung zu. Die zur Ermittlung der Koeffizienten notwendigen relativen Permittivitäten der angrenzenden Schichten, wurden im Rahmen der in Kapitel 8.1.3 vorgestellten Studie quantifiziert. Dabei wurde festgestellt, dass die relative Permittivität in erster Linie durch Pickfehler während der Interpretation von Schichtgrenzen im Radargramm, wodurch die Signallaufzeit t Messunsicherheiten aufweist, beeinflusst wird.

Die im vorliegenden Anwendungsfall auf Netzebene durchgeführten Georadarmessungen konnten nur bedingt zur Validierung der Ergebnisse der Objektebene herangezogen werden, da keine Bezugsgrößen vorhanden waren, um die Auswertungsergebnisse der Objektebene umfassend zu überprüfen. Der Konstruktionsaufbau war auf der Netzebene beispielsweise eine unbekannte Größe, sodass eine Überprüfung der Genauigkeit der Wiedergabe durch das Georadar eine genaue Kenntnis der tatsächlichen örtlichen Verhältnisse bedarf, welche allerdings im vorliegenden Anwendungsfall nur eingeschränkt zu eruieren waren. Hintergrund waren zeitliche Zwänge in Bezug auf die Erhaltungsmaßnahmen der jeweils zuständigen Landesstraßenbaubehörden, sodass die Anzahl an möglicher Ent-

nahmestellen je als homogen definierten Abschnitt begrenzt war und die entnommenen Bohrkern ausschließlich zur Feststellung des Konstruktionsaufbaus im Zuge der Kalibrierung der Georadar-Daten genutzt wurden. Die durchgeführten Beprobungen der Untersuchungsabschnitte gaben somit lokal Aufschluss über die Größe der relativen Permittivität, allerdings handelte es sich um eine punktuelle Betrachtung, welche repräsentativ für einen längeren und als homogen definierten Abschnitt stand. Fundiertere Aussagen in Bezug auf die Genauigkeit des Verfahrens waren anhand dieser begrenzten Anzahl an Referenzwerten nicht möglich.

Der wesentliche Unterschied zur Objektebene bestand dahingehend, dass die Netzebene als übergeordnete Ebene der Fragestellung andere Untersuchungsziele vorgibt. Dabei geht es vorrangig um die Verbesserung der Datenlage zu ausgewählten Untersuchungsabschnitten oder -netzen. In Abhängigkeit von der Fragestellung kann es in diesem Zusammenhang ausreichend sein, zunächst den Konstruktionsaufbau an sich überschlägig anhand der Anzahl an Reflexionen bzw. Schichtgrenzen im Radargramm sowie anhand von Aufbauwechseln zu charakterisieren und eine erste Definition von homogenen Abschnitten vorzunehmen. Da die genaue Kenntnis der wahren Tiefe von Schichtgrenzen nicht zwingender Bestandteil der Auswertung sein muss, reichen an dieser Stelle unter Umständen eine überschlägige Annahme der relativen Permittivität für die vorhandenen Asphaltsschichten und damit die Nutzung von unkalibrierten Georadar-Daten.

10.2 Genauigkeit des Georadarverfahrens im vorliegenden Anwendungsfall

In Kapitel 8.1.2 wurden anhand des Versuchsprogramms der Objektebene Abweichungsgrenzen für die Wiedergabe von Schichtgrenzen ermittelt. Dies erfolgte differenziert nach den drei Auswertemethoden zur Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Impulse und der relativen Permittivität der im Konstruktionsaufbau befindlichen Asphaltsschichten. Diese Abweichungsgrenzen gelten ausschließlich für den vorliegenden Anwendungsfall und unter Berücksichtigung der durch den Forschungsnehmer genutzten Messtechnik sowie des durchgeführten Processings und Post-Processings.

Die Messergebnisse haben in Teilen erhebliche Abweichungen und somit Abweichungsgrenzen aufgezeigt, welche im Zuge der Einbeziehung der Stationierung der Messdaten, vor allem im Bereich der Asphaltgrenze bautechnisch markanten Bereichen zugeordnet werden konnten. Unter Berücksichtigung straßenbautechnischer Aspekte, welche ebenfalls in Kapitel 8.1.2 beschrieben wurden, sind der Baulosanfang, der Aufbauwechsel sowie das Baulosende diesen Bereichen zuzuordnen. Gemäß dem Arbeitspapier Nr. 443A der FGSV sind diese Bereiche datenseitig auszuschließen. Dies führte dazu, dass die Abweichungsgrenzen enger gefasst werden konnten. Die weiteren Schichtgrenzen innerhalb des gebundenen Oberbaus hingegen zeigten durch diese datenseitige Optimierung keine wesentlichen Veränderungen.

Die Analyse der Einzelwerte führte zu dem Ergebnis, dass es sich zumeist um lokale Peaks in den Messdaten handelte, welche diese Abweichungen verursacht haben. Diese Peaks sind bautechnisch nicht zu erklären, da die korrespondierenden Bohrkernkerne der Objektebene keine entsprechenden Unterschiede in der Tiefe der betroffenen Schichtgrenze aufgezeigt haben. Unter Einbeziehung der Berechnungsmethodik sind diese Peaks in erster Linie der Auswertemethodik „unkalibriert_automatic“ zuzuschreiben, wie die nachfolgende Aufzählung belegt. Da die beiden weiteren Berechnungsmethoden keine derartigen Abweichungen gezeigt haben, ist die Signallaufzeit als potenzielle Ursache für die lokalen Abweichungen auszuschließen. Somit verbleiben rechnerisch die Amplitudenverhältnisse als Grundlage der Berechnung der Reflexionskoeffizienten respektive der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Impulse als Ursache für die festgestellten Abweichungen innerhalb dieser Berechnungsmethode.

Da es sich um lokale Peaks handelt, besteht aus Sicht der Verfasser eine Unverhältnismäßigkeit zwischen der Anzahl der Abweichungen und dem Einfluss auf die Aussage hinsichtlich der Genauigkeit des Verfahrens. Hierbei ist allerdings eine genauere Analyse zur Ursachenforschung durchzuführen, um zu eruieren, inwieweit Einflüsse aus zufälligen oder systematischen Messunsicherheiten oder Messabweichungen bestehen.

Auf Basis der Summenhäufigkeitstabellen der Anlage J4 wurden in diesem Zusammenhang empirische Anteilssätze ermittelt, welche die Abweichungen anhand von Abweichungsgrenzen absolut und

relativ einschließen. Dazu wurden die Abweichungen in Klassen der Breite $\pm 0,5$ cm von 0,0 bis 10,0 cm sowie alle darüber hinausgehenden Abweichungen kumuliert als „ $> \pm 10,0$ cm“ zusammengefasst. Als Bemessungsgröße wurde schließlich das 95%-Perzentil als Anteilssatz der Summenhäufigkeit definiert.

Vor diesem Hintergrund kann die Genauigkeit des Georadarverfahrens unter Nutzung der in Kapitel 3.4 dargelegten Messtechnik sowie des durchgeführten Processings und Post-Processings für den vorliegenden Anwendungsfall differenziert nach der Auswertemethode wie folgt angegeben werden:

1. „kalibriert_default_Value“:

- Asphaltdeckschicht – Asphaltbinderschicht: $\pm 1,5$ cm
- Asphaltbinderschicht – Asphalttragschicht: $\pm 2,5$ cm
- Zweilagige Asphalttragschicht: $\pm 2,5$ cm
- Asphaltgrenze: $\pm 2,5$ cm

2. „unkalibriert_default_Value“:

- Asphaltdeckschicht – Asphaltbinderschicht: $\pm 1,5$ cm
- Asphaltbinderschicht – Asphalttragschicht: $\pm 2,0$ cm
- Zweilagige Asphalttragschicht: $\pm 2,0$ cm
- Asphaltgrenze: $\pm 3,5$ cm

3. „unkalibriert_automatic“:

- Asphaltdeckschicht – Asphaltbinderschicht: $\pm 1,5$ cm
- Asphaltbinderschicht – Asphalttragschicht: $\pm 2,5$ cm bis 5,0 cm
- Zweilagige Asphalttragschicht: $\pm 4,0$ cm bis 7,0 cm
- Asphaltgrenze: $\pm 6,0$ cm bis 10,0 cm

Die dargelegten Genauigkeiten der Grenzflächen zwischen der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht gilt es in diesem Zusammenhang als fehlerbehaftet zu bewerten. Aufgrund der dünnen Schichtdicke zwischen 2,5 und 4,0 cm ist diese Schicht-

grenze mittels der genutzten Messtechnik respektive der Messfrequenzen vor allem im Bereich der Belastungsklasse Bk3,2 nicht aufzulösen und ausschließlich anhand der entnommenen Bohrkerne nachzuvollziehen. Im Bereich der Belastungsklasse Bk100 war die entsprechende Schichtgrenze besser abzuleiten, da in Teilbereichen der korrespondierenden Radargramme ansatzweise eine Schichtgrenze erkennbar und somit auch auszuwerten war.

In Kapitel 2.2 wurden Einsätze und Erfahrungen mit dem Georadarverfahren aus dem Ausland dargestellt und hinsichtlich der Messergebnisse und Schlussfolgerungen beschrieben. Aufgrund der zumeist unterschiedlichen Messsysteme, welche in den jeweiligen Forschungsprogrammen genutzt wurden, ist eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit denen des vorliegenden Anwendungsfalls nur bedingt möglich. Es wurde dargelegt, dass bei KHAMZIN et al. im Jahr 2017 eine zum vorliegenden Anwendungsfall vergleichbare Messtechnik und ein vergleichbares Versuchsprogramm genutzt wurden, um die Genauigkeit des Georadarverfahrens zu ermitteln. Dieses bezog sich auf die Gesamtdicke des Asphaltoberbaus von näherungsweise 34,0 cm, welches mit dem Bereich der Belastungsklasse Bk100 der Objektebene vergleichbar ist. Die relativen Abweichungen wurden unter Verwendung von unkalibrierten Georadar-Daten mit ca. 10,0 % und unter Verwendung von kalibrierten Georadar-Daten mit ca. 5,0 % angegeben, wobei eine konstante relative Permittivität von 5,00 angesetzt wurde. Unter Berücksichtigung der abweichenden relativen Permittivitäten haben die Auswertungen im vorliegenden Anwendungsfall vergleichbare relative Abweichungen aufgezeigt, wobei ausschließlich die Auswertemethoden 1 und 3 unter Verwendung von „default_values“ sowie die Asphaltgrenze als Maßgabe für die Gesamtdicke des gebundenen Oberbaus in den Vergleich eingehen. Im vorliegenden Anwendungsfall betragen die relativen Abweichungen unter den vorgenannten Rahmenbedingungen sowie unter Verwendung von unkalibrierten Georadar-Daten 10,3 % (3,5 cm zu 34,0 cm) und unter Verwendung von kalibrierten Georadar-Daten 7,4 % (2,5 cm zu 34,0 cm).

Vor dem Hintergrund der Abweichungsgrenzen erscheint eine Kalibrierung der Georadar-Daten durch eine Beprobung empfehlenswert. Die entsprechenden Entnahmestellen sind zweckmäßigerweise anhand einer visuellen Vorauswertung der Radargramme und den dabei ausgewiesenen homogenen

Abschnitten festzulegen. Allerdings ist eine Unterscheidung in Bezug auf die Fragestellung und Zielsetzung der Georadarmessung zu treffen. Dabei sollten zwei wesentliche Fragestellungen berücksichtigt werden. Einerseits kann die Georadarmessung ausschließlich zur Feststellung des Konstruktionsaufbaus herangezogen werden, um die grundsätzliche Datendichte zu einem Untersuchungsabschnitt zu erhöhen. In diesem Fall kann es ausreichend sein, wenn der Konstruktionsaufbau anhand des Schichtenprofils analysiert wird und konkrete Angaben hinsichtlich Schichtdicken etc. nicht gefordert sind. Sofern also keine schichtspezifische oder qualitätsorientierte Auswertungskomponente in der Zielsetzung enthalten ist, ist eine direkte Ansprache bzw. eine Beprobung und damit eine Kalibrierung der Georadar-Daten nicht notwendigerweise erforderlich. Dies unterliegt allerdings auch der Prämisse, dass der Konstruktionsaufbau straßenbautechnisch erfasst und angesprochen werden kann und durch ergänzende Unterlagen vollständig dokumentiert ist. Gleichermaßen erscheint es zweckmäßig, zusätzlich Entnahmestellen festzulegen, um zu einem späteren Zeitpunkt, zum Beispiel im Zuge der Vorbereitung einer Bau- oder Sanierungsmaßnahme, die Grundlage für eine Beprobung zu generieren. Dies gilt sowohl für die Beprobung der einzelnen und als homogen definierten Abschnitte als auch für potenziell geschädigte bzw. bautechnisch markante Bereiche der Straßensubstanz. In allen anderen Anwendungsfällen ist eine Beprobung und damit Kalibrierung der Georadar-Daten zwingend notwendig, um die Qualität des Messergebnisses und die Genauigkeit der Messdaten zu erhöhen. Der Verortung der Entnahmestellen kommt aus Sicht der Verfasser in diesem Zusammenhang eine fundamentale Bedeutung zu. Sofern die Entnahmestelle in einem Peak im Verlauf der Schichtgrenze im Radargramm verortet ist, wird durch die daraus resultierende Anpassung der relativen Permittivität im Zuge der Kalibrierung der Georadar-Daten der Verlauf der Schichtgrenze im Radargramm für den entsprechenden homogenen Abschnitt vertikal verschoben, woraus eine nachteilige Veränderung des Messergebnisses resultieren kann.

10.3 Zweckmäßige Festlegung der relativen Permittivität

Anhand der in Kapitel 8.1.3 dargelegten Auswertungen in Bezug auf die Quantifizierung der relativen Permittivität ϵ_r zeigt sich hinsichtlich der Zweckmäßigkeit und Nutzbarkeit der drei Berechnungsmethoden ein insgesamt diffiziles Bild. Von der reinen quantitativen Betrachtungsweise konnten mittels der Auswertungsergebnisse keine klaren Aussagen hinsichtlich der zu präferierenden Auswertemethode getätigt werden. So haben die Auswertungen der arithmetischen Mittelwerte der Anlage K gezeigt, dass je nach Messlinie und Schichtgrenze im gebundenen Oberbau jede Auswertemethode in Einzelfällen die geringsten Abweichungen zu der am Bohrkern ermittelten relativen Permittivität aufwies.

Unter Berücksichtigung der in der Anlage F4 dargelegten Längsprofile, welche die Tiefe der Schichtgrenzen im gebundenen Oberbau differenziert nach der Auswertemethode vergleichen, wurde deutlich, dass die Nutzung des Berechnungsalgorithmus „unkalibriert_automatic“ tendenziell die größten mittleren Abweichungen beinhaltete. Die Streuung aufeinanderfolgender Einzelwerte in Form von lokalen Peaks mit einer relativen Permittivität von bis zu 13,47 (Messlinie 2, untere Lage der Asphalttragschicht) ist vielfach als zu hoch zu bewerten und bautechnisch nicht erklärbar. Es zeigt sich daher ein erheblicher Einfluss des Berechnungsverfahrens auf das Messergebnis. Im Hinblick auf die zweckmäßige Vorgehensweise in der Wahl der Auswertemethode erscheint es unter Berücksichtigung der möglichst gleichmäßigen Wiedergabe der Tiefe einzelner Schichtgrenzen sinnvoller, die relative Permittivität für alle vorhandenen Schichten des jeweiligen Untersuchungsabschnitts zunächst mithilfe eines Erfahrungswertes (unkalibriert_default_Value) festzulegen. Anhand der in diesem Anwendungsfall dargelegten Auswertungsergebnisse liegt dieser zwischen 6,20 und 7,20. Dabei ist dieser Wert für alle vorhandenen Asphaltsschichten des gebundenen Oberbaus anzusetzen, da die Unterschiede in den verschiedenen Schichten insgesamt als gering zu bewerten sind. Bei anderen Medien, wie Beton, Pflaster, oder ungebundenen Schichten, welche nicht Gegenstand des vorliegenden Anwendungsfalles waren, ist die relative Permittivität entsprechend anders zu wählen. In erster Näherung sollte dazu auf Tabellenwerte der einschlägigen Literatur zurückgegriffen werden.

Grundsätzlich bestätigen die Auswertungsergebnisse der im vorliegenden Anwendungsfall durchgeführten Georadarmessungen die quantitative Vorgabe der relativen Permittivität von Asphalt der einschlägigen Literatur mit Werten zwischen 5,00 und 9,00, da nahezu alle Messwerte der dargelegten Studie innerhalb dieser Wertespanne liegen. Die zusätzliche Eingrenzung des Wertebereichs ist auf die Messergebnisse des vorliegenden Anwendungsfalles zurückzuführen und durch weitere Messungen und Untersuchungen zu validieren.

Die Auswertemethoden 1 und 3 fußen im Wesentlichen auf der Festlegung von standardisierten Werten (default Values) für die relative Permittivität und somit auf den Erfahrungshintergrund des auswertenden Personals. Dies beinhaltete eine erste Quantifizierung der relativen Permittivität mit 6,25 im Falle der unkalibrierten Georadar-Daten (unkalibriert_default_Value). Diese Festlegung liegt in Anbetracht der Auswertungsergebnisse an der unteren Grenze des abschließend ermittelten Wertebereichs. Für den vorliegenden Anwendungsfall ist daher die Wahl einer höheren relativen Permittivität von näherungsweise 6,40 bis 6,50 zu empfehlen.

Die Empfehlung eines konkreten Einzelwertes erscheint aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen nicht möglich und aus Sicht der Verfasser nicht zielführend. Die stoffliche Zusammensetzung eines Asphalttes ist als derart variabel einzuschätzen, dass jede Georadarmessung als Einzelfall betrachtet werden sollte, welcher gesonderten Rahmenbedingungen unterliegt. Im Zuge dessen ist auch die Wahl der weiteren messtechnischen Größen (Kapitel 3.3) auf den Einzelfall abzustimmen und entsprechend festzulegen.

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass aufgrund des erhöhten Risikos von erheblichen Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Konstruktionsaufbau und den entsprechenden Georadar-Daten, auf eine datenseitige Einbeziehung von bautechnisch markanten Bereichen verzichtet werden sollte. Dies ist darauf begründet, dass entsprechende Bereiche, wie zum Beispiel Aufbauwechsel, in der Örtlichkeit und im Radargramm unterschiedlich verortet bzw. interpretiert werden können und dadurch erhebliche Diskrepanzen in den Messergebnissen entstehen.

10.4 Bewertungsmatrizen

Die Bewertungsmatrizen stellen im vorliegenden Anwendungsfall die Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen auf Objekt- und Netzebene als Gesamtübersicht dar. Die Matrizen sind in der Anlage P aufgeführt.

Die Bewertungsmatrix der Objektebene stellt differenziert nach Messfrequenz und Scanrate die Detektierbarkeit des Konstruktionsaufbaus aus Schichtenfolge und Aufbauwechsel sowie der künstlich hergestellten Substanzschädigungen dar. Das Bewertungsschema unterscheidet in diesem Zusammenhang die nachfolgenden Bewertungen:

- „Nicht detektierbar“ (-) (orange Farbfüllung): Auf Basis der messtechnischen Eingangsgrößen war keine visuelle Erkennbarkeit und somit keine Auswertung und Interpretation im Radargramm möglich.
- „Im vorliegenden Anwendungsfall nicht detektiert“ (0) (weiße Farbfüllung): Durch die Konfiguration der Messtechnik am Messfahrzeug, unterliegen die genutzten Messantennen bzw. Messfrequenzen unterschiedlichen Messlinien (Bild 19), infolge dessen waren die lokalen Nester aus Fremdmaterial (Zeilennr. 13 bis 16) nicht mit der Messfrequenz $f = 2.000$ MHz detektierbar, da die Messlinien diese Substanzschädigungen nicht kreuzte. Angesichts der Detektierbarkeit durch die weiteren Messfrequenzen ist allerdings von einer grundsätzlichen Detektierbarkeit auszugehen.
- „Detektierbar“ (+) (Blaue Farbfüllung): Auf Basis der messtechnischen Eingangsgrößen war eine visuelle Erkennbarkeit und somit eine Auswertung und Interpretation im Radargramm möglich.

Darüber hinaus zeigt die Gesamtbewertung als Summe aller detektierbaren Merkmale und Schädigungen die zweckmäßigste Wahl der messtechnischen Eingangsgrößen auf.

Die Bewertungsmatrix der Netzebene stellt die im vorliegenden Anwendungsfall detektierten Substanzschädigungen und Konstruktionsaufbauten dar. Dabei umfasst die Bewertungsmatrix keine Ja/Nein-Analyse, wie es die Bewertungsmatrix der Objektebene vorsieht, sondern vielmehr eine grundlegende Übersicht über die Detektion selbst.

Das Bewertungsschema beschränkt sich in diesem Zusammenhang auf die Bewertung „Im vorliegenden Anwendungsfall detektiert“. Eine Unterscheidung hinsichtlich der detektierbaren und nicht detektierbaren Substanzschädigungen wurde im vorliegenden Anwendungsfall als unzweckmäßig empfunden, da keine Aussage zugelassen wird, ob eine Substanzschädigung nicht detektiert wurde, weil es die Festlegung der messtechnischen Größen verhinderte oder ob die Substanzschädigung gar nicht vorhanden war. Die entsprechenden Felder in der Bewertungsmatrix weisen eine weiße Füllfarbe und keinen Textbezug auf. Vor dem Hintergrund der zweckmäßigen Festlegung der messtechnischen Eingangsgrößen kann anhand der Bewertungsmatrix durch die vorgenannte Problematik keine eindeutige Aussage getroffen werden.

In Bezug auf die Detektion der Substanzschädigungen ist in diesem Zusammenhang die größtmögliche Scanrate in Scans/m zu empfehlen, wobei diese von der möglichen Messgeschwindigkeit abhängt. Auf den Untersuchungsabschnitten der Bundesstraßen betrug die Messgeschwindigkeit zwischen 50,0 und 80,0 km/h und auf denen der Bundesautobahnen 80,0 km/h.

11 Prüfung der Übertragbarkeit von Objekt- und Netzebene

Per Definition unterliegen Objekt- und Netzebene unterschiedlichen Rahmenbedingungen und verfolgen in Bezug auf die Nutzbarkeit des Georadarverfahrens unterschiedliche Fragestellungen und Zielsetzungen (Kapitel 4.1 und 6.1). In ihrer Arbeitsanleitung aus dem Jahr 2003 gibt GOLKOWSKI diesbezüglich eine allgemeine Übersicht über die jeweiligen Anwendungsgebiete (Bild 61).

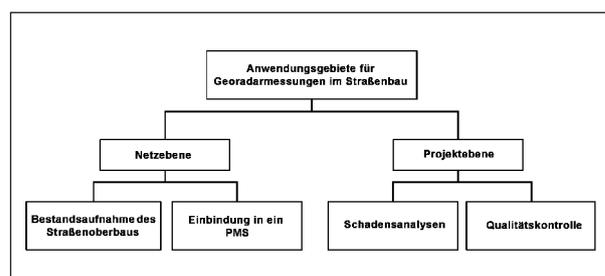


Bild 61: Anwendungsgebiete für Georadarmessungen

Demnach zielen Georadarmessungen auf der Objekt- bzw. Projektebene vorwiegend auf die Kontrolle der Einbauqualität oder die Feststellung lokaler Substanzschädigungen im Zuge der Vorbereitung von Bau- oder Sanierungsmaßnahmen ab. Auf der Netzebene wiederum liegt der Mehrwert des Verfahrens in der grundsätzlichen Erfassung des Konstruktionsaufbaus großräumiger Strecken- oder Netzabschnitte. Dabei wird der Erweiterung der vorhandenen Datengrundlage hohe Priorität eingeräumt. Darüber hinaus liegt ein Hauptnutzen in der Ausweisung homogener Abschnitte sowie geschädigter Streckenabschnitte, welches beispielhaft in Kapitel 8.3 aufgezeigt wurde. Eine Schnittstelle zwischen den beiden Ebenen besteht dahingehend, dass die Einsatzmöglichkeiten auf der Objekt- bzw. Projektebene grundsätzlich auf den Erkenntnissen der Netzebene beruhen. Für einen konkreten Einzelfall sind die Erkenntnisse der Netzebene aufzugreifen und um notwendige zusätzliche Daten zu ergänzen. Diese sind zum Beispiel durch eine Beprobung zu gewinnen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auf der Netzebene Untersuchungsabschnitte vorhanden sein können, welche aufgrund der gewachsenen Struktur der Straßensubstanz sowie einer längeren Erhaltungsgeschichte vielfach unterschiedliche Konstruktionsaufbauten aufweisen. Diese umfassen zumeist nur kurze Streckenabschnitte und verursachen daher eine Vielzahl an Aufbauwechseln. Dies kann die Auswertung und Interpretation der entsprechenden Georadar-Daten erschweren und zu einem Mehraufwand in der Beprobung des Untersuchungsabschnittes führen, da sich die Anzahl der homogenen Abschnitte sowie der dazugehörigen Bohrkernentnahmestellen erhöht. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde dies auf der Bundesstraße B10 in Rheinland-Pfalz festgestellt, wobei keine eigene Beprobung durch den Forschungsnehmer vorgenommen werden konnte (Kapitel 6.3). Die Bilder 62 bis 64 zeigen auf einer Länge von ca. 190,0 Metern diverse unterschiedliche Konstruktionsaufbauten, welche eine homoge-

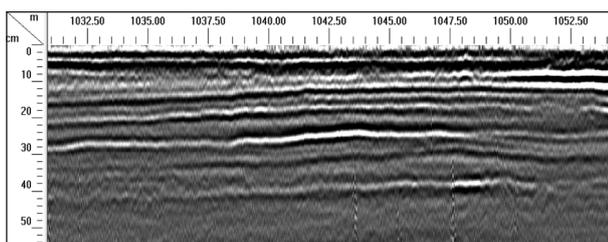


Bild 62: Konstruktionsaufbau der Bundesstraße B10 zwischen den Stationen 1+032 und 1+053 (Scanrate = 25 Scans/m)

ne Abschnittsbildung nur bedingt zulassen und eine Auswertung und Interpretation der Radargramme beeinträchtigen.

Im vorliegenden Anwendungsfall entsprach die Objektebene einer idealisierten Versuchsstrecke, welche unter bekannten Rahmenbedingungen hergestellt wurde. Zu diesen zählten insbesondere der Konstruktionsaufbau, die homogenen Abschnittslängen sowie die genaue Stationierung und Ausprägung von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen. Auf Netzebene ist dieser Informationsgehalt in der Regel nicht zu erwarten. Vielmehr werden Georadarmessungen durchgeführt, um entsprechende Daten über ausgewählte Untersuchungsabschnitte oder über ein zusammenhängendes Netz zu gewinnen. Der Standardfall beinhaltet dabei zumeist, dass der Konstruktionsaufbau eine unbekannte Größe darstellt und im Bereich der Bundesfernstraßen aus den Straßeninformationbanken der Bundesländer abgeleitet wird. Der erwartbare Informationsgehalt ist dabei je nach Bundesland aller Voraussicht nach unterschiedlich. Darüber hinaus sind in der Regel keine Informationen zu homogenen Abschnitten oder Substanzschädigungen vorhanden, sofern diese nicht über die messtechnische ZEB und damit über die Straßenoberfläche erkennbar oder zumindest ableitbar sind. Ein größerer Informationsgehalt ist zu erwarten, wenn ein Untersuchungsabschnitt in der Erhal-

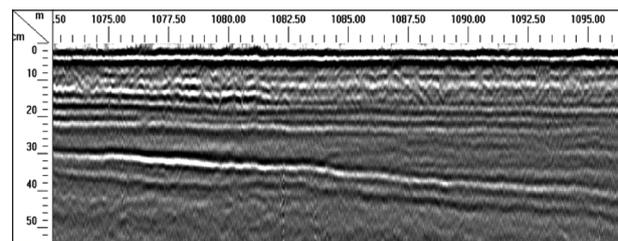


Bild 63: Konstruktionsaufbau der Bundesstraße B 10 zwischen den Stationen 1+073 und 1+097 (Scanrate = 25 Scans/m)

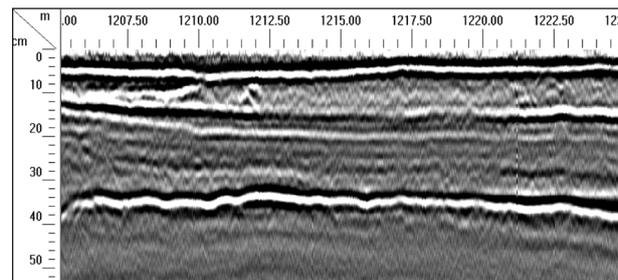


Bild 64: Konstruktionsaufbau der Bundesstraße B 10 zwischen den Stationen 1+205 und 1+225 (Scanrate = 25 Scans/m)

tungsplanung des Baulastträgers Berücksichtigung gefunden hat und entsprechend bereits saniert oder in der Erhaltungsplanung hoch priorisiert ist und im Zuge der Bauvorbereitung unter Umständen bereits beprobt wurde.

Neben der Feststellung des Konstruktionsaufbaus liegt das Hauptziel des Georadarverfahrens auf der Detektion von Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde die grundsätzliche Übertragbarkeit anhand von künstlich erzeugten Strukturen auf der Objektebene simuliert und deren Wiedererkennung auf der Netzebene untersucht. Die Messergebnisse zeigten diesbezüglich eine eingeschränkte Übertragbarkeit. Prinzipiell war keine bautechnische Übertragbarkeit gegeben, da die Substanzmerkmale und Substanzschädigungen auf der Objektebene künstlich hergestellt wurden und somit grundsätzlich von den Schadensursachen der auf der Netzebene zu erwartenden Schädigungen abweichen. So resultieren die Schädigungen auf Netzebene in erster Linie aus dem Alter der Straße und der damit einhergehenden Belastung aus dem Straßenverkehr und der Witterung. An dieser Stelle seien als Beispiel die künstlichen Risse der Objektebene genannt, welche durch nachträgliches Einschneiden einzelner oder mehrerer Asphaltsschichten hergestellt wurden. Dieses Vorgehen lässt sich im Bereich der Netzebene auf die nachträgliche Fugenerstellung bei Betonbefestigungen übertragen. Eine weitere vergleichbare Risscharakteristik ist bei querverlaufenden Einzelrissen zu finden, wobei der Rissverlauf zu beachten ist. Ansonsten ist auf Netzebene vorwiegend von Belastungsrissen auszugehen, welche zum einen wesentlich kleinere Breiten und zum anderen einen chaotischen Verlauf aufweisen.

In Bezug auf die Feststellung von Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen lassen die Messergebnisse im vorliegenden Anwendungsfall somit zwei wesentliche Schlussfolgerungen zu:

1. Quer zur Messrichtung verlaufende Substanzschädigungen und Substanzmerkmale sind durch Diffraktionshyperbeln erkennbar. Es liegt somit die grundsätzliche Möglichkeit der Detektion und Eingrenzung in der Örtlichkeit vor. Allerdings ist die direkte Ansprache nicht gegeben, da sowohl Leitungen, größere lokale Hohlräume oder Risse vergleichbare visuelle Merkmale im Radargramm aufzeigen und somit nur eingeschränkt visuell unterscheidbar sind.

2. Substanzschädigungen und Substanzmerkmale, welche in Messrichtung verlaufen, wie unzureichender Schichtenverbund, sind im Radargramm bzw. in den O-Scopes in der Tendenz anhand eines veränderten Wellenmusters ableitbar. Die Auswertungen der O-Scopes zeigen, dass unzureichender Schichtenverbund in der Tendenz durch drei statt zwei maßgebliche Halbwellen respektive Extremwerte im Amplitudenverlauf charakterisiert werden konnte (Kapitel 8.2.2). Vor dem Hintergrund der Definition von homogenen Abschnitten besteht daher grundsätzlich die Möglichkeit ein entsprechendes Kriterium für die Festlegung von Abschnittswechsels zu generieren.

Insgesamt ist der Einsatz einer Georadarmessung sowohl auf der Netz- als auch auf der Objekt- oder Projektebene nutzbar, wobei die Fragestellungen und Zielsetzungen variieren. Auf Netzebene liegt das Hauptaugenmerk auf der Bestandserfassung gesamtheitlicher Netze oder Teilnetze, wobei schnelfahrende fahrzeugmontierte Messsysteme genutzt werden. Die Erfassung der Straßensubstanz aus Schichtenfolgen und Schichtdicken steht dabei im Fokus. Durch die Erfassung des vorhandenen Konstruktionsaufbaus lässt sich das betrachtete Netz in homogene Abschnitte unterteilen, welche einen vergleichbaren Aufbau aufweisen. In Korrelation mit den RStO lassen sich dadurch Ableitungen hinsichtlich der Dimensionierung und der korrespondierenden Belastungsklassen treffen und darüber hinaus Substanzschädigungen und Substanzmerkmale genauer verorten und als markante Bereiche ausweisen.

12 Visualisierung von Messergebnissen

12.1 Art und Umfang des Messergebnisses

Die Art und der Umfang des Messergebnisses der Georadarmessung hängen maßgeblich von der Fragestellung und Zielsetzung ab. Im Standardfall ist das Ergebnis ein Radargramm, welches die Straßensubstanz entlang der definierten Messlinien entweder im Längs- oder Querprofil abbildet. Wie in Bild 4 dargestellt, ist die bevorzugte Darstellung ein im Graustufenformat farbcodiertes Radargramm. Das Radargramm kann dabei die Georadar-Daten

im Rohformat oder aber im Anschluss an das Processing darstellen. Zur Generierung eines vollständigen Messergebnisses sind in jedem Fall beide Bearbeitungsstände separat zu behandeln und für potenzielle weitere Untersuchungen zu einem späteren Zeitpunkt zu sichern. Inwieweit beide Bearbeitungsstände als Messergebnis dem Auftraggeber zu Verfügung gestellt werden, ist im Einzelfall zu klären. In jedem Fall zählen sämtliche generierten Ausgabedaten zum Messergebnis. Im vorliegenden Anwendungsfall generierte die genutzte Softwarelösung folgende Ausgabeformate:

- SIR 20®:
 - DZT-File: Datei enthält Informationen zu den Messeinstellungen, zur Messtechnik und zum Processing.
 - LAY-File: Datei enthält Informationen zu Datenpunkten und Layerdefinitionen.
 - GTR-File: Datei enthält Informationen über Kalibrierungspunkte.
 - MDB-File: Microsoft® Access Datenbank enthält Informationen zu Markierungspunkten und Ortsbezügen.
- SIR 30®:
 - DZT-File: Datei enthält Informationen zu den Messeinstellungen, zur Messtechnik, und zum Processing.
 - DZX-File: Datei enthält Informationen zu Markierungspunkten und Ortsbezügen, Layerdefinitionen und Datenpunkten, 3D Informationen und weiteren Processing-Schritten zur Darstellung und Skalierung.

Vor dem Hintergrund der ingenieurtechnischen Nutzbarkeit des Messergebnisses ist von der alleinigen Darstellung in Form des Radargramms abzuraten, da nicht notwendigerweise das nötige Fachwissen zur Interpretation beim Auftraggeber vorhanden ist. Es ist vielmehr eine interpretierte Ausgabe der Ergebnisse der Georadarmessung anzustreben. Dazu zählen insbesondere Schichtenprofile, welche die Schichtgrenzen der Straßensubstanz sowie deren Definitionen und Informationen im Linienformat darstellen. Darüber hinaus ist die Erstellung eines Schichtenverzeichnisses sinnvoll, welches die Schichtgrenzen quantitativ belegt. Dabei ist besondere Sorgfalt auf die Verortung der Mess-

Scan,Dist.(m),AC D 2-Way Time,AC D Amplitude,AC D Depth(cm),AC D Layer Vel.(cm/s),AC D Layer Dietl.,AC B 2-Way Time,AC B Amplit
5,0,000,0,445,445,00,2,97,13,28,5,10,1,289,351,00,8,39,12,97,5,34,,,,,1,969,1322,00,13,12,13,27,5,10
20,1,000,0,469,2927,00,3,28,13,90,4,65,1,289,157,50,8,50,13,12,5,22,,,,,2,344,1931,00,17,54,14,89,4,05
40,2,000,0,445,507,00,3,01,13,46,4,96,1,289,1324,00,8,63,13,29,5,08,,,,,3,445,2380,00,22,89,13,23,5,13
60,3,000,0,445,1311,00,2,91,12,99,5,33,1,465,693,50,9,91,13,46,4,96,,,,,3,281,802,00,21,47,12,77,5,51
80,4,000,0,445,1447,00,2,99,13,34,5,05,1,571,583,00,10,41,13,19,5,17,,,,,3,445,1441,00,20,63,11,77,5,49
100,5,000,0,469,800,00,3,17,13,47,4,95,1,541,729,50,11,00,13,34,5,05,,,,,3,375,684,00,22,50,13,27,5,10
120,6,000,0,469,1104,00,3,09,13,13,5,21,1,564,593,00,10,97,13,06,5,27,,,,,3,516,1049,00,23,37,15,23,5,13
140,7,000,0,445,1486,00,2,87,12,83,5,46,1,554,673,00,10,78,12,90,5,40,,,,,3,469,1037,00,23,65,13,00,5,34
160,8,000,0,445,1603,00,2,90,12,97,5,34,1,676,351,00,10,59,12,59,5,68,,,,,3,586,1181,00,23,16,12,86,5,43
180,9,000,0,445,1602,00,2,88,12,87,5,43,1,688,294,00,10,94,12,90,5,40,,,,,3,609,1397,00,22,91,12,64,5,63
200,10,000,0,445,1536,00,2,83,12,66,5,61,1,676,328,00,10,93,12,99,5,33,,,,,3,586,990,00,20,17,11,05,7,36
220,11,000,0,445,1574,00,2,81,12,58,5,68,1,688,301,00,10,82,12,77,5,52,,,,,3,563,672,00,23,01,12,86,5,43
240,12,000,0,,,,,1,734,392,00,11,06,12,70,5,57,,,,,3,305,1156,00,21,04,12,68,5,59
260,13,000,0,445,1613,00,2,81,12,57,5,69,1,745,635,50,11,03,12,58,5,68,,,,,3,375,792,00,21,12,12,46,5,79
280,14,000,0,445,1763,00,2,78,12,41,5,85,1,757,701,00,11,28,12,78,5,51,,,,,3,469,1182,00,21,93,12,59,5,67
300,15,000,0,445,1575,00,2,85,12,75,5,53,1,735,298,50,11,11,12,75,5,53,,,,,3,680,1503,00,22,80,12,34,5,90
320,16,000,0,480,914,50,3,04,12,61,5,65,1,594,441,00,10,04,12,54,5,72,,,,,3,680,1274,00,23,34,12,63,5,63
340,17,000,0,445,1583,00,2,82,12,59,5,67,1,547,411,00,9,59,12,34,5,90,,,,,3,656,1366,00,23,04,12,55,5,71
360,18,000,0,433,1923,50,2,71,12,43,5,82,1,523,596,00,9,64,12,60,5,66,,,,,3,422,990,00,21,32,12,41,5,84
380,19,000,0,445,1612,00,2,81,12,56,5,70,1,477,484,00,9,40,12,67,5,60,,,,,3,352,897,00,21,12,12,55,5,74
400,20,000,0,469,1400,00,2,97,12,63,5,63,1,489,436,50,9,02,11,86,6,46,,,,,3,375,1012,00,21,11,12,46,5,79
420,21,000,0,469,1371,00,3,00,12,74,5,54,1,464,1020,50,9,32,12,66,5,61,,,,,3,569,902,00,20,44,11,28,7,06
440,22,000,0,469,1155,00,2,95,12,52,5,73,1,414,1265,33,8,71,12,16,6,13,,,,,3,569,838,00,22,68,12,68,5,59
460,23,000,0,,,,,1,477,283,00,9,39,12,66,5,61,,,,,3,609,914,00,22,82,12,59,5,67
480,24,000,0,469,1501,00,2,96,12,55,5,71,1,536,431,00,9,73,12,63,5,63,,,,,3,586,717,00,22,26,12,27,5,97
500,25,000,0,,,,,1,523,449,50,9,69,12,66,5,61,,,,,3,398,1186,00,20,87,11,99,6,25

Bild 65: Beispielhafter CSV-Export im Rohformat der Messlinie 2 der Objektebene (f = 2.000 MHz, Scanrate = 20 Scans/m, Stationierungsrastrer = 1 m)

daten zu legen, um zum Beispiel Entnahmestellen einer potenziellen Beprobung festzulegen und zu verorten. Es ist in diesem Zusammenhang unerheblich, ob die Stationierung mittels Wegaufnehmer oder GNSS bestimmt wird.

Aus Gründen der Praktikabilität ist es zweckmäßig, das Schichtenverzeichnis direkt aus dem Datenexport des Post-Processings zu erstellen (Bild 65). Die CSV-Exporte der im vorliegenden Anwendungsfall genutzten Softwarelösung sind entsprechend in der Anlage C aufgeführt.

Neben dem Schichtenprofil und Schichtenverzeichnis sind alle weiteren Messdaten, welche im Zuge der Georadarmessung gewonnen wurden, als Messergebnis anzusehen. Im vorliegenden Anwendungsfall zählten dazu sowohl die videotechnische Aufnahme der Straßenoberfläche sowie die auf Objekt- und Netzebene durchgeführten Beprobungen zuzüglich der damit einhergehenden Laboruntersuchungen. Ebenfalls zählten zum Messergebnis die durch im Rahmen der Qualitätskontrolle durchgeführten Untersuchungen zum Einbauzustand und Konstruktionsaufbau der Versuchsstrecke sowie die materialtechnologischen Untersuchungen an den verwendeten Asphaltmischgütern und Baustoffgemischen. Nicht zuletzt zählten zum Messergebnis sämtliche weitere Planunterlagen, welche im Rahmen der Georadarmessung erstellt und zur erfolgreichen Bearbeitung der Fragestellung und Zielsetzung genutzt wurden.

12.2 Darstellung von Georadar-Daten in ingenieurtechnisch nutzbaren Formaten

Eine wesentliche Zielsetzung der Georadarmessung ist die Wiedergabe der Struktur der Straßensubstanz eines Untersuchungsabschnitts. Dazu zählen zum einen der Konstruktionsaufbau des gebundenen und gegebenenfalls ungebundenen Oberbaus aus Schichtenfolge und Schichtdicken und zum anderen die Erkennung von Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen. Die Messergebnisse sind in diesem Zusammenhang derartig aufzubereiten, dass die Zielsetzung der Georadarmessung erreicht wird und das Ergebnis ingenieurtechnisch durch den Auftraggeber genutzt werden kann. Im vorliegenden Anwendungsfall wird in diesem Zusammenhang eine beispielhafte Aufbereitung des Messergebnisses dargelegt.

Der Konstruktionsaufbau wird als Schichtenverzeichnis gemäß des beim Datenexport definierten Stationierungsrastrers durch die Distanz und Stationierung gemäß der Betriebskilometrierung ausgegeben. Die vorhandenen Schichten werden durch die Schichtgrenze der Unterseite in cm angegeben (Bild 66).

Die unterste Schichtgrenze des gebundenen Oberbaus ist als Asphaltgrenze definiert, welche mit einem Farbcode belegt ist. Dies ist gleichzeitig als Farbband im Schichtenprofil dargestellt und dient der Einordnung jeder Station in eine Belastungsklasse gemäß den RStO. Dabei ist im Vorhinein eine Bauweise festzulegen, welche die Wertespanspannen der Belastungsklassen definiert. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde gemäß den RStO12 – Tafel 1 die Asphaltbauweise Zeile 1 „Asphalttrag-schicht auf Frostschuttschicht“ herangezogen, da diese die gängigste im Bundesfernstraßennetz ist (Tabelle 28).

Bei nachträglicher Modifizierung der Bauweise, zum Beispiel bei der Feststellung einer Verfestigung, ist die Einteilung der Gesamtmächtigkeit des gebundenen Oberbaus entsprechend der neuen Bauweise zu modifizieren. Ein Auszug des Schichtenprofils des Untersuchungsabschnitts der BAB 38 ist als Beispiel in Bild 67 dargestellt. Dabei werden die vorhandenen Schichtgrenzen in einer Liniendarstellung visualisiert.

Dist.(m)	Stationierung	ACD	ACB	ACT	ACT 2	Beton
204	167 + 704					33,0
205	167 + 705					32,6
206	167 + 706					31,9
207	167 + 707					31,2
208	167 + 708					31,3
209	167 + 709	3,9	11,0	17,6	31,9	
210	167 + 710	3,7	11,0	17,6	31,4	
211	167 + 711	3,4	11,0	17,6	30,8	
212	167 + 712	3,4	11,3	17,4	31,0	
213	167 + 713	3,3	11,6	17,5	30,3	
214	167 + 714	3,3	12,2	17,6	29,6	
215	167 + 715	3,3	12,2	17,7	30,6	

Bild 66: Beispielhafte Struktur des Schichtenverzeichnisses

Gesamtmächtigkeit des gebundenen Oberbaus in cm		Korrespondierende Belastungsklassen der RStO 12 – Tafel 1 – Zeile 1	Farbschema
	≥ 34,0	Bk100	Grün
≥ 30,0	bis < 34,0	Bk32	Grün-Gelb
≥ 26,0	bis < 30,0	Bk10	Gelb
≥ 22,0	bis < 26,0	Bk3,2	Orange
≥ 20,0	bis < 22,0	Bk1,8	Rot
	< 20,0	Bk0,3	Rot-Schwarz

Tab. 28: Einteilung der Gesamtmächtigkeit des gebundenen Oberbaus gemäß RStO mit entsprechender Farb-codierung für die Visualisierung

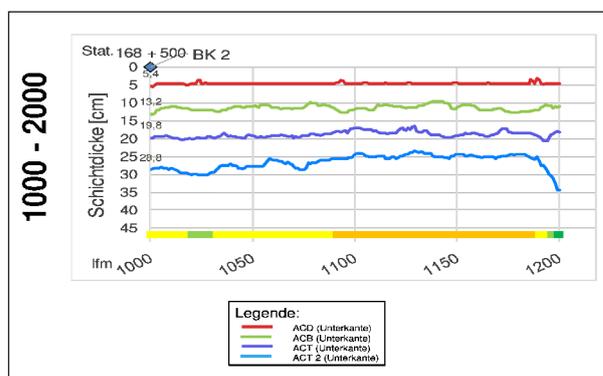


Bild 67: Ausschnitt des Schichtenprofils zwischen den Stationen 1+000 bis 1+200 der BAB 38 in Fahrtrichtung Leipzig

Ergänzend zum Konstruktionsaufbau besteht das abschließende Messergebnis in der Definition von homogenen Abschnitten (Kapitel 8.3). Diese lassen sich gemäß den im vorliegenden Anwendungsfall entwickelten Homogenitätskriterien ebenfalls in Form eines Längsprofils visualisieren (Bild 68).

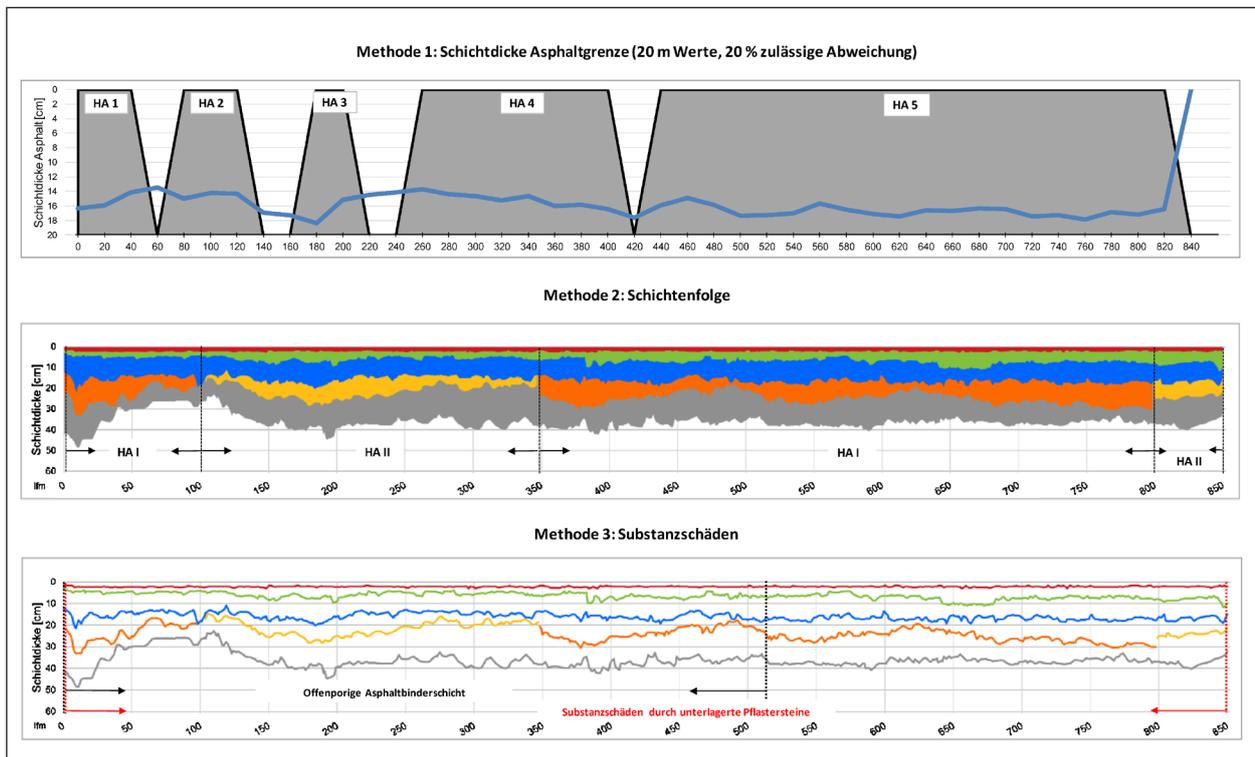


Bild 68: Auszug aus einer abschließenden Darstellung der homogenen Abschnitte des Untersuchungsabschnitts der B79

12.3 Verschneidung des Georadarverfahrens mit der messtechnischen ZEB

Nach aktuellem Stand der Technik werden Substanzschädigungen an Straßen mittels einer messtechnischen ZEB durch die Merkmalsgruppe Substanzmerkmale (Oberfläche) gemäß den Arbeitspapieren Nr. 9 (AP Nr. 9) Reihe M festgestellt. Dabei wird durch die an der Straßenoberfläche sichtbaren Schädigungen auf Störungen in der Straßensubstanz geschlossen. Da keine direkte Messmethodik vorliegt, handelt es sich ausschließlich um abgeleitete und nicht direkt bestimmte Größen. Die sichtbaren Schädigungen werden durch die parallele Videoaufzeichnung der Straßenoberfläche erfasst und anschließend ausgewertet. Als Erfassungsgrößen sind in diesem Zusammenhang für Asphaltbefestigungen die nachfolgenden Zustandsmerkmale aufgeführt:

- Netzrisse und Risshäufungen
- Flickstellen
- Ausbrüche
- Einzelrisse und offene Arbeitsnähte
- Bindemittelanreicherungen

Es handelt sich um Zustandsmerkmale, welche durch das Oberflächenbild auf „erkennbare strukturelle Schäden der Fahrbahnbefestigung“ [AP Nr 9/ M2 Kapitel 7] schließen lassen. Die Zustandsindikatoren als quantitative Bewertungsgröße sind die prozentual betroffenen Flächenanteile der Straßenoberfläche. Diese Herangehensweise ermöglicht allerdings nur bedingt konkrete Ableitungen hinsichtlich Art, Umfang und Ursache der Schäden in der Straßensubstanz. Die Problematik besteht darin, dass nicht alle Substanzschädigungen von der Straßenoberfläche abgeleitet werden können und daher auch nicht im Rahmen einer videotechnischen Aufzeichnung respektive messtechnischen ZEB erkannt werden.

Mit dem Georadar steht ein ergänzendes Messverfahren zur Verfügung, um die Qualität und den Konstruktionsaufbau einer einzelnen Straße oder eines zusammenhängendes Straßennetzes festzustellen. Vor dem Hintergrund der Erfassungsmethodik gibt es Schnittstellen zur messtechnischen ZEB, welche die Möglichkeit der Kombination und Verknüpfung beider Verfahren nahelegen. So kann eine erfassungstechnische Verknüpfung in der videotechnischen Aufzeichnung der Straßenoberfläche gesehen werden. In beiden Fällen wird eine entsprechende Aufzeichnung vorgenommen, um

eine Verbindung zwischen der Straßenoberfläche und der Straßensubstanz herzustellen und daraus potenzielle Abhängigkeiten abzuleiten. Darüber hinaus handelt es sich in beiden Fällen um schnellfahrende und fahrzeugmontierte Messsysteme, welche die Straße als Untersuchungsmedium zerstörungsfrei aufnehmen. Der wesentliche Vorteil in der Kombination beider Messverfahren besteht somit in der parallelen Betrachtung der wesentlichen Komponenten Oberfläche und Substanz des Anlagensystems Straße.

Um den zerstörungsfreien und schnellfahrenden Charakter des Georadarverfahrens aufrecht zu erhalten, ist im Zusammenhang mit der messtechnischen ZEB zunächst auf eine Kalibrierung der Georadar-Daten und damit auf eine Beprobung des Untersuchungsabschnitts zu verzichten. Das bedeutet, dass der tatsächliche Konstruktionsaufbau und die direkte Ansprache der Straßensubstanz kein Bestandteil des Messergebnisses sein können. Das Georadarverfahren ermöglicht daher zunächst grundlegende Aussagen über die Anzahl der vorhandenen Schichten im Ober- und Unterbau sowie über die Abfolge und den Verlauf der entsprechenden Schichtgrenzen. Eine Abschätzung hinsichtlich der Dicke der vorhandenen Schichten kann angesichts der angenommenen relativen Permittivitäten zu diesem Zeitpunkt nur näherungsweise erfolgen. Dies gilt für die Abschätzung der Gesamtdicke des gebundenen sowie des ungebundenen Oberbaus gleichermaßen. Infolge der zu diesem Zeitpunkt ausstehenden direkten Ansprache der Straßensubstanz ist zunächst von einer Vorauswertung der Georadar-Daten auszugehen.

Es bietet sich an, im Zuge der Vorauswertung eine parallele Einteilung des Untersuchungsabschnitts in homogene Abschnitte vorzunehmen. Diese sollte mittels der visuellen Auswertung der Radargramme erfolgen. Dabei verbleibt die Entscheidung, ob eine Beprobung des Untersuchungsabschnitts zeitnah erfolgen soll oder erst zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen der Vorbereitung einer zukünftigen Baumaßnahme in der Erhaltungsplanung. Die spätere direkte Ansprache der Straßensubstanz ist aus Sicht der Verfasser zwingend notwendig, um genaue Kenntnisse über die Verhältnisse in der Straßensubstanz zu erlangen. Dies schließt das gezielte Auffinden von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen, wie zum Beispiel Leitungen, ein. Die Beprobung ermöglicht darüber hinaus die genauere Bestimmung der Dicke der vorhandenen Schichten und darüber hinaus eine materialtech-

nologische Begutachtung, zum Beispiel zur Feststellung von teerhaltigen Schichten mit Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen (PAK).

Vor dem Hintergrund der Feststellung von Substanzschädigungen im Radargramm gibt es aus Sicht der Verfasser zwei Schnittstellen zu den Zustandsmerkmalen der messtechnischen ZEB:

1. Bei Flickstellen an der Straßenoberfläche (ZWFLI) kann von lokalen Aufbauwechseln und Störungen in der Struktur des Oberbaus ausgegangen werden. Dabei ist die Folge von zwei oder mehreren Aufbauwechseln in kurzen Abständen charakteristisch.
2. Die messtechnische ZEB erfasst durch den Zustandswert ZWRISS Risshäufungen, Netzrisse und Einzelrisse an der Straßenoberfläche. Da diese Risse durchaus auch durchschlagenden Charakter haben können und sich nicht ausschließlich auf die Straßenoberfläche beschränken müssen, kann mit dem Georadarverfahren durch Diffraktionshyperbeln im Radargramm eine grundsätzliche Feststellung dieser Schädigungen getroffen werden.

Insgesamt stellt das Georadarverfahren somit eine potenzielle Ergänzung zur messtechnischen ZEB dar, da dieses nicht die Straßenoberfläche, sondern auf die Detektion der Straßensubstanz abzielt. Auf diese Weise können sowohl Substanzschädigungen, welche nicht aus der Straßenoberfläche ableitbar sind, detektiert werden als auch eine gezieltere Ursachenforschung zu aufgetretenen Schäden betrieben werden.

Im Zuge der Verschneidung beider Messverfahren bietet sich eine kombinierte Visualisierung in Streckenbändern an. In Kooperation mit der Heller Ingenieurgesellschaft mbH aus Darmstadt wurde in diesem Zusammenhang eine mögliche Visualisierung der Verschneidung erarbeitet. Die Bilder 69 und 70 zeigen dazu eine beispielhafte Möglichkeit der Darstellung. Es handelt sich um den Untersuchungsabschnitt der BAB 2 zwischen den Anschlussstellen Bielefeld-Ost und Gütersloh in Nordrhein-Westfalen. Dabei wird der Konstruktionsaufbau durch das Georadarverfahren einerseits als gebundener (rot) und ungebundener Oberbau (grau) und andererseits schichtspezifisch abgebildet. Die dargestellten Georadar-Daten beziehen sich dabei auf den Hauptfahrstreifen der linken Fahrbahn.

BAB A 2 - Fahrtrichtung Dortmund - Hauptfahrstreifen

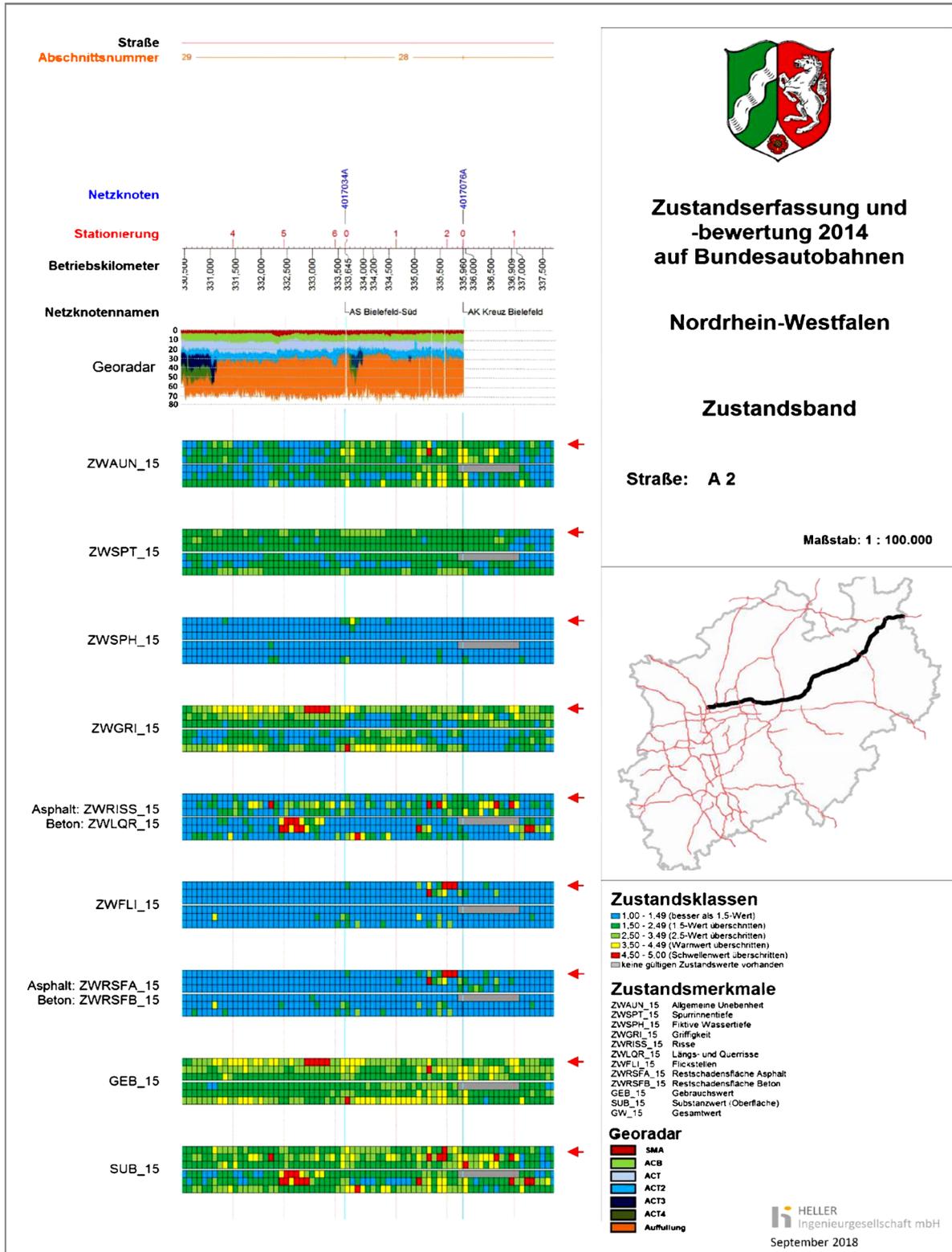


Bild 71: Verschneidung von Georadar-Daten mit den Zustandsbändern der messtechnischen ZEB für die BAB 2 zwischen AS Bielefeld-Ost und AS Gütersloh [Heller Ingenieurgesellschaft mbH, 2018]

Neben den Georadar-Daten umfassen die dargestellten Streckenbänder die Betriebskilometrierung, den Streckenquerschnitt, den Aufbau des Hauptfahrstreifens inklusive des Materialschlüssels der Landesstraßenbaubehörde Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen sowie das Deckschichtalter und die Verkehrsbelastung aus dem Jahr 2010.

Die beispielhaften Streckenbänder wurden seitens der Heller Ingenieurgesellschaft mbH mit der Software ProfileCustomizer erstellt.

Ein Beispiel für die Verschneidung von Georadar-Daten und den Zustandsbändern der messtechnischen ZEB ist in Bild 71 dargestellt.

13 Bauvertragliche Anknüpfungspunkte

Aufgrund der dargelegten Unsicherheiten und Abweichungen der Messdaten zum Georadarverfahren in Bezug auf die Wiedergabe des Konstruktionsaufbaus sowie der grundlegenden strukturellen Verhältnisse der Straßensubstanz ist eine Einbindung dieses Messverfahrens in die bauvertragliche Abwicklung aktuell als schwierig zu bewerten. In Bezug auf den wesentlichen Mehrwert des Verfahrens hinsichtlich der quasi-kontinuierlichen Erfassung des Konstruktionsaufbaus bestehen zum aktuellen Zeitpunkt keine ausreichenden Erfahrungen zu den Ursachen dieser Unsicherheiten sowie deren schlussendlicher Einfluss auf das spätere Messergebnis. Es gestaltet sich somit schwierig, einheitliche Standards im Rahmen des Processings und Post-Processings zu definieren, welche diese Messabweichungen und Unsicherheiten zu den einzelnen Messgrößen bzw. des Verfahrens an sich korrigieren. Dies ist zum einen den verschiedenen Messsystemen am Markt geschuldet, zu denen es aktuell noch keine vergleichende Studie hinsichtlich der Vorgehensweise in der Erfassung, Verarbeitung und Ausgabe von Georadar-Daten gibt. Zum anderen erschwert die nach aktuellem Stand der Technik vordringlich manuelle Auswertung und Interpretation der Georadar-Daten die Vergleichbarkeit von Messungen. Dadurch resultiert die Qualität des Messergebnisses der Georadmessung fundamental aus dem Erfahrungshintergrund und straßenbautechnischen Wissen des auswertenden Personals. Um diesen Umstand zukünftig zu minimieren, wurden durch den Forschungsnehmer ers-

te Ansätze für eine Automatisierung der Auswertung konzipiert (Kapitel 14).

Darüber hinaus kann die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen nicht zweifelsfrei gewährleistet werden, da Einflussgrößen auf das Messergebnis in der gesamten Prozesskette des Messverfahrens auftreten und aufgrund der Verfahrenstechnik unvermeidbar sind. Als Beispiel sei an dieser Stelle die Notwendigkeit der Einhaltung von Messlinien bei der Durchführung von Georadmessungen unter Wiederholbedingungen genannt. Dieses gestaltet sich sowohl durch das Messen im fließenden Verkehr als auch durch die notwendige Einhaltung des Fahrweges des Messfahrzeuges bei Messgeschwindigkeiten von bis zu 100,0 km/h auf Bundesfernstraßen schwierig.

Insgesamt ist aus Sicht der Verfasser somit aktuell keine einheitliche technische Grundlage gegeben, welche eine bauvertragliche Verankerung des Georadarverfahrens zulassen würde. Das Georadarverfahren befindet sich zum aktuellen Zeitpunkt im Prozess der Erfahrungssammlung, um Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen sowie die Möglichkeit von einheitlichen Mess- und Auswertestandards zu erforschen. In einem ersten Ansatz greift dazu das durch die FGSV veröffentlichte Arbeitspapier Nr. 443A die grundlegende Verfahrenstechnik hinsichtlich der Bestimmung von Schichtdicken mit dem Georadarverfahren, potenzielle äußere Störeinflüsse sowie Hinweise zur Durchführung und die Auswahl zweckmäßiger Messtechnik auf.

Die bauvertraglichen Anknüpfungspunkte des Georadarverfahrens sind somit aus Sicht der Verfasser aktuell weniger in der eigentlichen strukturellen Analyse der Straßensubstanz zu sehen, sondern vielmehr in der Steuerung und Kontrolle der Qualität von Baumaßnahmen sowie in der Erhaltungsplanung. Das Georadar ermöglicht es, den Konstruktionsaufbau und die Struktur der Straßensubstanz quasikontinuierlich entlang von Messlinien abzubilden. Durch den Einsatz von bodengekoppelten Antennensystemen können entsprechende Bauflächen sowohl im Längs- als auch im Querprofil aufgenommen werden, um so ein vollständiges Bild der Struktur der Straßensubstanz zu generieren. Vor dem Hintergrund von Kontrollprüfungen und zusätzlichen Kontrollprüfungen kann dies als Werkzeug für eine bessere Festlegung von Entnahmestellen sowie der zugeordneten Teilflächen genutzt werden. Aktuell sehen die ZTV Asphalt-StB in diesem Zusammenhang, zum Beispiel bei der Abgren-

zung von Teilflächen im Zuge der Durchführung von zusätzlichen Kontrollprüfungen, ausschließlich Abgrenzungen nach Augenschein oder mittels radio-metrischer Verfahren vor. Das Georadarverfahren kann hierbei eingesetzt werden, da zum Beispiel die Flächenauswahl anhand der Prüfparameter Schichtenverbund und Einbaudicke ermöglicht wird. Diese sind augenscheinlich im Radargramm abzugrenzen, da die betroffenen Schichtgrenzen in der Tendenz abweichende Wellenmuster zeigen. Dabei ist anzumerken, dass weitere gezielte Untersuchungen zu diesem Sachverhalt durchzuführen sind, um gesicherte Erkenntnisse zu erzielen. Die auf Basis der vorliegenden Auswertungen vorwiegend als Tendenzen und weniger als gesicherte Erkenntnisse zu verstehenden Ergebnisse liefern dazu einen Beitrag. Es handelt sich in diesem Zusammenhang allerdings um eine rein visuelle Auswertung von O-Scopes. Dieses Vorgehen kann ebenfalls im Zuge der Eigenüberwachungsprüfungen durch den Auftragnehmer genutzt werden. So können Bereiche, welche nicht den vertraglichen Anforderungen entsprechen, festgestellt und in der Fläche eingegrenzt werden. Des Weiteren können Mängel in der Herstellung schneller erkannt und deren Ursache entsprechend behoben werden.

Im vorliegenden Anwendungsfall konnte gezeigt werden, dass auf Basis der Ergebnisse der Georadarmessungen eine Einteilung der Untersuchungsabschnitte in homogene Abschnitte möglich war. Diese basierten im vorliegenden Anwendungsfall auf drei Homogenitätskriterien, welche kombiniert zu einer abschließenden Definition von Aufbauwechseln bzw. Abschnittswechseln herangezogen werden konnten. Im Zuge einer Bauvorbereitung können diese als homogen definierten Abschnitte zur besseren Abschätzung und Kalkulation von Massen in der Aufnahme und Entsorgung sowie als Basis zur Ermittlung von Einbaumengen in der Herstellung bzw. Sanierung genutzt werden. Auch wenn aus ökonomischer und bautechnischer Sicht mehrere homogene Abschnitte zusammengefasst werden, können auf Basis des dargelegten Auswerters von 20 Meter je Auswerteabschnitt die notwendigen Längen in der Aufnahme und im Einbau näherungsweise abgeschätzt werden. Dabei sollten die im Zuge der Bauvorbereitung geplanten Bohrkernentnahmen unterstützende Informationen über die tatsächliche Gesamtdicke des gebundenen Oberbaus liefern. Es ist zu erwarten, dass auf diese Weise genauere Ergebnisse gegenüber einer Massenermittlung, welche alleinig auf einzelnen Bohrkernen basiert, erzielt werden.

Darüber hinaus bietet das Georadar die Möglichkeit markante Untergrundverhältnisse aufzudecken, welche im Bauablauf entsprechend zu berücksichtigen sind, sofern diese Bestandteil der Baumaßnahme sind. Zu diesen zählen insbesondere überbaute Bestandsstrukturen und Materialwechsel, zum Beispiel in Form von zementgebundenen Tragschichten mit gegebenenfalls vorhandenen Dübel- und Ankerlagen oder Leitungstrassen.

14 Konzeptionierung und Umsetzung automatisierter Auswertungen

14.1 Automatisierung des Post-Processings

14.1.1 Datenstrukturierung

Im Zuge von umfangreichen Georadarmessungen, zum Beispiel bei netzweiten Untersuchungen, entstehen eine Vielzahl an Datensätzen, da mehrere Untersuchungsabschnitte oder ganze Untersuchungsstrecken Gegenstand der Betrachtung sind. In Abhängigkeit von der Fragestellung sind diese zusätzlich in die zu untersuchenden Fahrtrichtungen und Fahrstreifen weiter zu unterteilen. Jede Georadarmessung umfasst in diesem Zusammenhang eine eigene Datenstruktur, welche von der eingesetzten Messtechnik generiert wird. Aus Gründen der Übersichtlichkeit, der Zuordnung von Georadar-Daten zu einem bestimmten Untersuchungsabschnitt und des separat durchzuführenden Post-Processings, bietet es sich an, diese Datenstruktur vorzuformatieren und mittels vordefinierter Ablageorte zu strukturieren. Die im vorliegenden Anwendungsfall genutzte Messtechnik SIR® 20 bzw. SIR®30 generiert in diesem Zusammenhang die in Kapitel 12.1 dargelegten Dateitypen je Datensatz.

Die Vorformatierung der Datenstruktur impliziert einen Programmbaustein, welcher nachfolgende Informationen benötigt:

1. Zielverzeichnis als Speicherort aller generierten Dateitypen.
2. Quellverzeichnis der generierten Dateitypen um eine Datenverschiebung in das Zielverzeichnis zu ermöglichen (enthält die Daten aller durchgeführten Georadarmessungen in chronologischer Abfolge).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Datelleichnung:											
2	Ordner:	T:\										
3												
4	Strasse	Datei										
5	Am Dorn	336	337									
6	Am Dorn 1	338	339									
7	Am Dorn 2	340										
8	Am Helmerzbach 1	308										
9	Am Helmerzbach 2	309	310									
10	Am Helmerzbach 3	311										
11	Am Langenbach	296	297									
12	Ahornweg	316	317									
13	Bahnhofstrasse 2	328	329									
14	Bahnhofstrasse 3	326	327									
15	Bahnhofstrasse 4	324	325									
16	Bahnhofstrasse	302										
17	Birkenweg	318	319									
18	Buchenweg	312	313									
19	Eichenweg	314	315									

Bild 72: Tabellenkalkulatorische Oberfläche mit Zuordnung von Untersuchungsabschnitt und Nummerierung als Grundlage für die Erstellung von Zielverzeichnissen und der Verschiebung der entsprechenden Datensätze

3. Datennummerierung bei mehreren Datensätzen, welche fortlaufend gemessen wurden und gegebenenfalls einem Untersuchungsabschnitt zugeordnet werden müssen, wie zum Beispiel Fahrtrichtungen oder Fahrstreifen.

Die fortlaufende Nummerierung resultiert aus der Abfolge der Georadarmessungen, welche zum Beispiel anhand eines Befahrungsplans festgelegt wurde. Die Nummerierung sollte automatisch vergeben und den Messungen fortlaufend zugeordnet werden. Um Unstimmigkeiten in der Zuordnung zu vermeiden, empfiehlt es sich, diese im Rahmen der Datenstrukturierung in einem entsprechend vorformatierten Tool zu hinterlegen und nach dem Verschieben der Datensätze in die Zielverzeichnisse stichprobenartig auf Plausibilität zu prüfen (Bild 72).

Die Datenstrukturierung dient somit in erster Linie der Sortierung der aufgenommenen Messdaten, welche anhand eines entsprechenden Tools in automatisch erzeugte Zielverzeichnisse verschoben werden. Dabei werden zur korrekten Zuordnung und Bündelung der Messdaten Dateinamen und Dateinummerierungen als Eingangsinformationen benötigt.

14.1.2 Datenvorbereitung

Die Datenvorbereitung umfasst die ersten Schritte des in Kapitel 3.4.2 vorgestellten Processings und dient der Vereinfachung der späteren Datenauswertung und Dateninterpretation des Post-Processings. Dazu zählen insbesondere folgende Arbeitsschritte:

1. Einlesen der Rohdaten, wobei die Standardfilter des Processings durch die Software vorgegeben werden. Die Rohdaten werden im Anschluss als separate Datei im Quellverzeichnis (bei der Datenstrukturierung das Zielverzeichnis) abgelegt.

2. Die Georadar-Daten umfassen zumeist längere Strecken, als für die eigentliche Untersuchung vorgesehen und notwendig. Hintergrund ist beispielsweise ein fliegender Start bei Messungen auf Bundesfernstraßen, wo ein Einmessen vor Ort durch den fließenden Verkehr verhindert wird. Die Georadar-Daten bzw. die entsprechenden Radargramme sind daher auf die Ziellänge zuzuschneiden. Dies kann anhand der Angabe der jeweiligen Scannummern (Start- und Endwert) erfolgen, wobei die definierte Scanrate in Scans/m zu beachten ist.

3. Untersuchungsstrecken, welche in zwei Fahrtrichtungen aufgenommen wurden, sind einseitig zu drehen, um eine querschnittsgetreue und parallele Auswertung beider Fahrtrichtungen vornehmen zu können. Dies ist vor allem im Hinblick auf die Aufnahme von Querprofilen und die stationsgetreue Entnahme von Bohrkernen im Querschnitt sinnvoll. Bei Untersuchungen im Bundesfernstraßennetz kann dieser Schritt bei baulich getrennten Fahrbahnen entfallen.

4. Sofern eine Parallelmessung mit mehreren Antennen und gegebenenfalls unterschiedlichen Messfrequenzen durchgeführt wurde, werden die entsprechenden Rohdaten der Georadarmessung zunächst verknüpft dargestellt. Im Zuge der antennen- und frequenzspezifischen Kalibrierung der Messdaten sind die Rohdaten zu splitten.

5. Alle Rohdaten sind frequenz- und antennenspezifisch zu kalibrieren. Dazu werden entweder vor oder nach der Georadarmessung Kalibrierungsdateien über einer Metallplatte erzeugt (Bumper Jump Files) (Bild 11). Die Kalibrierungsdateien dienen der Einführung der Straßenoberfläche als Bezugshorizont für das Radargramm (Time Zero – Station 0 in vertikaler Achsrichtung) sowie der Filterung von stationären Reflexionen von Oberflächen, wie beispielsweise vom Messfahrzeug.

Aus Sicht der Verfasser ist das Potenzial zur Automatisierung im Bereich der Datenvorbereitung im vorliegenden Anwendungsfall und unter Nutzung der vorgenannten Softwarelösung nach aktuellem Stand der Technik nicht gegeben. Hintergrund ist die Ausrichtung der Software auf eine rein grafische Benutzeroberfläche, welche keine Möglichkeiten der Implementierung von entsprechenden automatisierten Bausteinen außer durch den Hersteller selbst ermöglicht. In diesem Zusammenhang gilt es

alternative Softwarelösungen dahingehend zu analysieren und auf entsprechende Potenziale für Automatisierungen auszuwerten.

14.1.3 Datenauswertung

Die Auswertung von Georadar-Daten unterliegt einer grundsätzlichen Zweiteilung, deren Bearbeitung durch die Fragestellung und Zielsetzung der Messung vorgegeben wird. Es ist das vordringliche Ziel den Konstruktionsaufbau eines Untersuchungsabschnitts oder eines größeren Untersuchungsnetzes aufzunehmen und entlang der Messlinien abzubilden. Um dies zu ermöglichen werden die gewonnenen Messdaten hinsichtlich der Schichtgrenzen und Aufbauwechsel ausgewertet und interpretiert. Darüber hinaus können Substanzschädigungen und Substanzmerkmale anhand spezifischer Diffraktionshyperbeln oder abweichender Wellenmuster visuell im Radargramm erkannt und interpretiert werden.

Die standardisierte Interpretation von Schichtgrenzen umfasst die optische Erkennung von Reflexionen im zeitlichen Verlauf der Scans. Diese werden als Samples mit einer hohen positiven oder negativen Amplitude dargestellt, welcher ein spezifischer Farbwert zugeordnet wird, wobei die Spannweite der einem Farbcode zugeordneten Amplitudenwerte variieren kann. Zumeist wird das Radargramm in einem linearen Graustufenformat visualisiert, wobei zunehmend positive Amplituden einen höheren Weißwert und zunehmend negative Amplituden einen höheren Schwarzwert aufweisen. Da ein Radargramm aus aufeinanderfolgenden Scans mit entsprechenden Farbcodes besteht, werden Reflexionen mit hohen Amplitudenwerten in der Regel als fortlaufende horizontale Linien dargestellt (Bild 73). Die vertikale Skala wird in diesem Zusammenhang zweckmäßiger Weise in Samples eingeteilt.

Die Reflexion einer Schichtgrenze mit ausreichendem dielektrischen Kontrast besteht hierbei aus drei Halbwellen, wobei identisch polarisierte Vor- und Nachläufer sowie ein entgegengesetzt polarisierter Maximalpeak charakteristisch sind. Eine entsprechende Schichtgrenze wird im Radargramm daher dreigeteilt dargestellt (Bild 74), wobei der Maximalpeak sowohl positiv (wie dargestellt) als auch negativ polarisiert sein kann, was eine Umkehrung der Schwingungsrichtung bedeutet.

Eine bessere Erkennbarkeit der Reflexionen kann durch eine optische Verstärkung durch Änderung

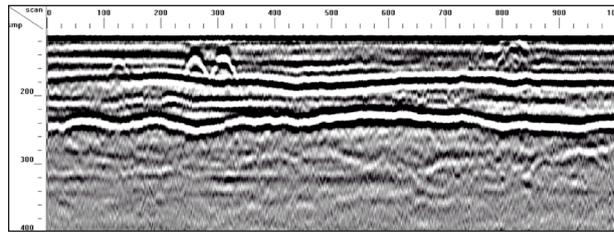


Bild 73: Radargramm im Graustufenformat mit Schichtgrenzen unterschiedliche Farbcodierung und Ausprägung

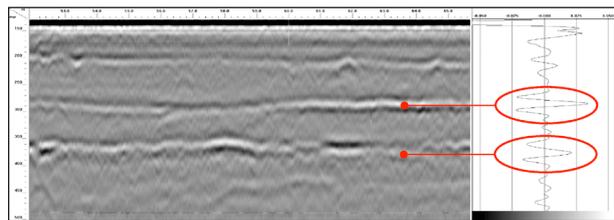


Bild 74: Signalverlauf eines Scans an zwei Schichtgrenzen mit ausreichendem dielektrischem Kontrast (Display Gain = 25, f = 2.000 MHz, Scanrate = 100 Scans/m)

Distanz	Scan/Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	1	125440	427320	499648	-816224	1052928	1110116	1079040	972800	-789744	563820	306020
0,05	2	1418224	447744	-721920	-986448	1069568	1120256	-1082880	-968704	-789424	-551680	-279040
0,1	3	160512	152220	-459752	-731848	-944896	-3076480	-1124952	-1093120	967880	-786440	-544768
0,15	4	109972	-133376	-434312	-1002880	-919808	-1052144	-1109760	-1079992	-901824	-791040	-551776
0,2	5	177664	-133120	-438784	-713984	-931072	-1068288	-1121792	-1088768	-977408	-788976	-561152
0,25	6	138440	181448	-480376	-724896	900224	1083160	1122048	1072384	947712	-758228	-536400
0,3	7	138752	194608	-466800	-712200	-916464	-1049088	-1091584	-1003888	-934800	-726224	-524800
0,35	8	187424	-140544	-645904	-718544	-928756	-1059072	-1104640	-1064960	-948480	-766208	-528384
0,4	9	133888	-173688	-474688	-740096	-847200	-1072640	-1114624	-1079992	-952320	-770660	-532480
0,45	10	131840	-172444	-471040	-739912	-938496	-1063348	-1106440	-1062144	-946688	-762332	-534328
0,5	11	143104	-159928	-452912	-713472	-918892	-1061152	-1089004	-1041852	-934872	-744192	-509440
0,55	12	162816	-143616	-417004	-710400	-919808	-1050112	-1097884	-1062912	-953844	-774704	-544544
0,6	13	147712	-138464	-459264	-728084	-933888	-1061376	-1104896	-1064448	-949504	-769792	-534172
0,65	14	152276	-153800	-454856	-723200	-933316	-1063024	-1111552	-1073162	-968976	-779264	-541624
0,7	15	411136	132096	-178056	-473600	-739328	-944640	-1069824	-1114112	-1077104	-955136	-775424
0,75	16	956440	432128	351040	-809512	448044	-727024	946176	1073920	1118976	1075200	953448
0,8	17	772728	594112	416512	141236	-159488	-463376	-714240	-912748	-1059872	-1084028	-1042688
0,85	18	828416	774400	630272	410824	135168	-168704	-466688	-731136	-936192	-1060932	-1103616
0,9	19	800256	844404	788464	648584	424704	250228	153844	452884	721152	890048	1060808
0,95	20	538132	889468	786464	871200	789760	652800	472408	142816	145368	442392	712704
1	21	-890888	109312	122048	525444	691968	801792	834004	783360	638720	437356	139776
1,05	22	229632	-42208	137764	148160	548864	711288	813568	838868	782056	632008	406016
1,1	23	-179392	-260864	-94976	306496	323228	530944	704236	818432	838624	821544	674816
1,15	24	-355400	-219120	-81408	131312	322560	522240	687360	795126	829440	779520	638720
1,2	25	1485144	-320400	-68152	135144	314972	513760	699136	809912	839936	788992	648448
1,25	26	181216	-246784	-82272	100936	139744	519880	687204	798208	833834	785152	644400
1,3	27	304440	-229612	-40608	126720	133056	514560	691640	801792	835536	781568	641792
1,35	28	142528	-222768	-60928	133388	131504	520160	702200	801688	836608	781168	639232

Bild 75: Beispielhafte Export-Matrix aus Scan, Sample und Amplitude

der Skalierung der Amplituden erreicht werden. Da es sich bei der Interpretation von Schichtgrenzen somit ausschließlich um die Erkennung von hohen Amplitudenwerten auf Basis eines zugeordneten Farbwertes im Radargramm handelt, beinhaltet dieser Vorgang aus Sicht der Verfasser Potenziale für automatisierte Algorithmen.

Im Zuge der Erstellung von Datenexporten besteht die Möglichkeit der Ausgabe der Amplitudenwerte in einer Matrix, wobei die Anzahl der Scans (horizontale Richtung) unabhängig der gewählten Scanrate über der Anzahl an Samples (vertikale Richtung) aufgetragen wird. Die Matrix umfasst somit als Datensatz Scan, Sample und Amplitude (Bild 75).

Um in dieser Matrix die maßgebende Amplitude der Schichtgrenze zu lokalisieren, wird eine Extremwertanalyse durchgeführt. Diese Analyse sucht in einzelnen Scans gezielt nach Extremstellen, welche zur Bildung einer Schichtgrenze in einem be-

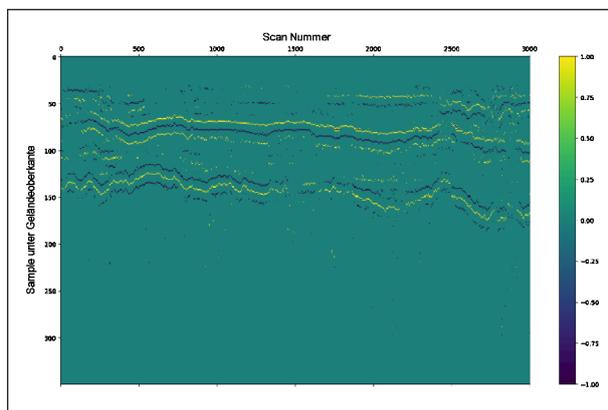


Bild 76: Grafisches Ergebnis der Extremwertanalyse einer Amplitudenmatrix

stimmten Verhältnis zum Amplitudenverlauf vorheriger und nachfolgender Scans stehen müssen, um mit diesen als potenzielle Schichtgrenze verbunden werden zu können. Zur Lokalisierung von Extremwerten ist in diesem Zusammenhang ein Grenzwert zu definieren, bei dessen Überschreitung ein datenseitiger Extremwert ausgegeben wird. Dieser Grenzwert wurde im vorliegenden Anwendungsfall anteilig mit 10,0 % zur Amplitude der Oberflächenreflexion definiert. Das grafische Ergebnis einer solchen Extremwertanalyse ist in Bild 76 dargestellt.

Es zeigt sich, dass eine Schichtgrenze aus drei Extremwerten gebildet wird. Für eine automatisierte Auswertung der Schichtgrenze ist allerdings eine einzelne Extremstelle notwendig, welcher ein Datenpunkt im Radarogramm zugeordnet wird. Aus diesem Grund ist eine Extremwertreduktion durchzuführen, welche zwei Extremwerte aus jeder Schichtgrenze aussortiert. Aufgrund der unterschiedlichen Abstände der Extremwerte innerhalb des zeitlichen Verlauf eines Scans sowie die variierende Halbwellenpolarisation, bietet es sich an, die Extremwertreduktion anhand einer Envelope um den O-Scope eines Scans durchzuführen. Per Definition als positiver Realteil der Hilbert-Transformation des Signals, weist die Envelope je Schichtgrenze genau einen Berührungspunkt je Schichtgrenze auf (Bild 77).

Die ursprüngliche Envelope verläuft sehr unregelmäßig, welches auf die Anzahl an Samples je Scan zurückgeführt werden kann. Im vorliegenden Anwendungsfall wurden in den Versuchsprogrammen der Objekt- und Netzebene sämtliche Georadarmessungen mit 512 Samples/Scan durchgeführt. Möglicherweise ist diese Samplerate in Bezug auf die Extremwertanalyse als zu niedrig einzuschätzen. Aus diesem Grund wurde eine Glättung der

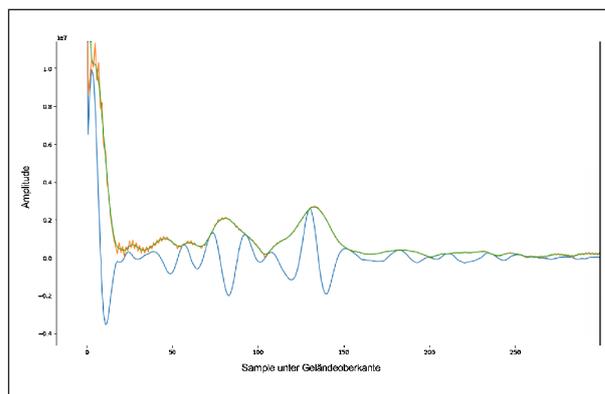


Bild 77: O-Scope eines Scans mit einer errechneten (orange) und einer geglätteten (grünen) Envelope um den positiven Realteil

Envelope durch die Bildung von Mittelwerten benachbarter Samples durchgeführt. Dadurch wurden eine Reduzierung der Datenpunkte im Envelope und gleichzeitig eine Kurvenglättung erzielt.

Da die Extremwerte der Envelope nicht zwangsläufig mit der Position der maximalen Amplitude hinsichtlich des Samples übereinstimmen, dient die Envelope an dieser Stelle nur als Hilfswerkzeug bzw. als Auswahlkriterium für einen einzelnen Extremwert. Mithilfe einer Abfrage bezüglich des Abstandes zwischen den drei Peaks der Halbwellen der Schichtgrenze und dem Extremwert der Envelope werden durch die Vorgabe einer Minimalbeziehung zwei der drei Extremwerte aussortiert. Somit wird die maximale Amplitude, welche zu dem Extremwert der Envelope den kleinsten Abstand an Samples aufweist, als tatsächlicher Extremwert für die Schichtgrenze identifiziert. Hierdurch entsteht wiederum eine Matrix aus einzelnen Extremwerten, welche keine Verbindung in Bezug auf die Schichtgrenze aufweisen. Damit eine Schichtgrenze datenseitig erkannt werden kann, müssen die Extremwerte zu Schichtgrenzen respektive Layern verbunden werden. Diese Verbindung muss Parametern unterliegen, welche bestimmte Grenzwerte nicht überschreitet, damit keine Extremwerte verbunden werden, die datenseitig und in der Dateninterpretation nicht zusammengehören. Es empfiehlt sich an dieser Stelle zunächst eine Analyse der Lage- und Abstandsbeziehung benachbarter Extremwerte durchzuführen. Auf diese Weise werden ausschließlich Extremwerte verbunden, welche eine definierte Anzahl an Samples in vertikaler Richtung und eine definierte Anzahl an Scans in horizontaler Richtung unterschreiten. Gleichzeitig besteht zu diesem Zeitpunkt die Möglichkeit der Filterung von kurzen Einzelelementen sowie einzelnen Extremwerten (Bild

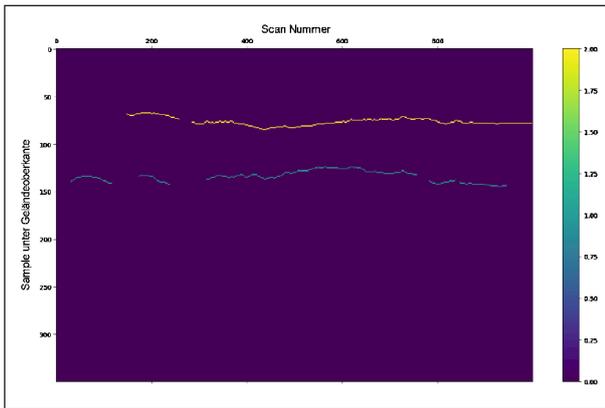


Bild 78: Entwurf einer Verbindung von Extremwerten zu größeren Schichtelementen bei gleichzeitiger Filterung von Einzelwerten

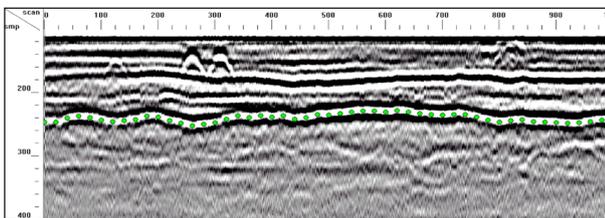


Bild 79: Picks in einer Schichtgrenze im Radargramm deren Punktinformationen aus der Extremwertanalyse abgeleitet und in die vorhandene Datenstruktur wieder implementiert wurden

78). Die Zuordnung kann durch die visuelle Vorauswertung des entsprechenden Radargramms gestützt werden, in der auf Basis der Reflexionen auf die voraussichtliche Anzahl der vorhandenen Schichtgrenzen im Konstruktionsaufbau geschlossen wird und eine Definition von Layern erfolgt.

Zur nachträglichen Bearbeitung der auf diese Weise generierten Schichtelemente ist durch das auswertende Personal eine zwangsläufige Plausibilitätsprüfung sowie ggf. Korrektur der Elemente durchzuführen. Hintergrund ist zum Beispiel, dass nicht notwendigerweise eine vollständige Schichtgrenze über die gesamte Anzahl an Scans generiert wird und noch eine Vielzahl an Datenlücken vorhanden sein kann. Vor allem bei häufigen Aufbauwechseln und komplexen Strukturverhältnissen in der Straßensubstanz ist diese nachträgliche Plausibilitätsprüfung unumgänglich. Diese sollte aus Gründen der verbesserten Darstellung wieder zurück in die Datenstruktur der Softwarelösung (hier: DZX-Files) überführt werden. Durch die Definition der Layer innerhalb der visuellen Vorauswertung sind ferner alle relevanten Metadaten für die Implementierung der automatisiert erstellten Extremwerte vorhanden. Diese sind zunächst durch ihre Layer-, Scan- und Samplenummer definiert. Es bietet sich

an, die als technische Eingangsgröße definierte Scanrate zu nutzen, um aus den Extremwerten Picks in der Schichtgrenze in einem konstanten Raster über den gesamten Untersuchungsabschnitt zu generieren. Darüber hinaus wird auf diese Weise die Datenmenge auf ein überschaubares Maß reduziert. Die vorgenannten Punktinformationen reichen in diesem Zusammenhang zur Verortung der Picks im Radargramm aus (Bild 79).

Alle weiteren Punktinformationen, welche für eine straßenbautechnische Interpretation zweckmäßig sind, sind diesen Punkten durch Vorgabe der relativen Permittivität ϵ_r bzw. der Ausbreitungsgeschwindigkeit v zuzuordnen, um die tatsächliche Tiefe im Radargramm zu ermitteln.

Eine Automatisierung der Auswertung von Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen in der Straßensubstanz, wie zum Beispiel unzureichender Schichtenverbund oder Risse, wird seitens der Verfasser als sehr komplex angesehen. Wie bereits dargelegt, führen diese zu einzelnen Diffraktionshyperbeln im Radargramm. Deren Ausprägung lässt näherungsweise auf die Größe des Merkmals oder der Schädigung schließen, ohne eine konkrete Identifikation zuzulassen. Die Diffraktionshyperbeln erstrecken sich in diesem Zusammenhang über eine bestimmte Wertespanne an Samples je Scan, wobei sich die vertikale Anordnung innerhalb der Scans in fortlaufender horizontaler Richtung verschiebt. Charakteristisch für die Diffraktionshyperbeln sind einerseits der parabelförmige Verlauf unter der Prämisse eines orthogonal zur Messrichtung verlaufenden Objektes, wodurch der Scheitelpunkt die wahre Lage in der Straßensubstanz darstellt, als auch der negative Koeffizient im quadratischen Teilterm der Funktionsgleichung, wodurch die Hyperbel nach unten geöffnet ist. Dadurch, dass keine direkte Zuordnung zwischen der Diffraktionshyperbel und dem eigentlichen Substanzmerkmal oder der Substanzschädigung besteht, ist keine Grundlage für eine systematische Auswertung gegeben. Das Risiko von Fehlinterpretationen ist an dieser Stelle als erheblich einzustufen.

Im Bereich flächenhafter Störstellen oder Objekten, wie zum Beispiel unzureichender Schichtenverbund, sind die visuellen Charakteristika im Radargramm ausschlaggebend für eine potenzielle automatisierte Auswertung. Wie bei intakten Schichtgrenzen bietet es sich an, diese flächenhaften Merkmale mittels der Amplitudenverläufe in den betroffenen Scans auszuwerten. Da die Größe der

Amplitude einer Schichtgrenze maßgeblich vom dielektrischen Kontrast zwischen den benachbarten Schichten abhängt, ist die relative Permittivität dieser Materialien wesentliches Kriterium für die Einschätzung des Amplitudenverlaufs und Ausprägung der Amplitude. Es besteht in diesem Zusammenhang ein Risiko zur Fehlinterpretation, da der dielektrische Kontrast zwischen zwei Schichten, mit entsprechend unterschiedlicher relativer Permittivität, in der Amplitude dem gestörten Schichtenverbund zwischen zwei Schichten ähneln und dadurch im Radargramm irrtümlich als Schädigung interpretiert werden kann. Der abweichende Verlauf des Scans im Bereich der Grenzfläche (Kapitel 8.2.1) kann durch die Extremstellenreduzierung im Zuge des automatisierten Pickens an dieser Stelle kein Zuordnungskriterium sein. Somit sind konkrete Informationen über den tatsächlichen Konstruktionsaufbau erforderlich, um diese Fehlerquelle zu minimieren. Diese sind in der Regel über die Entnahme von Bohrkernen zu gewinnen. Am Bohrkern lässt sich dann gleichzeitig der unzureichende Schichtenverbund direkt visuell feststellen, sofern der Bohrkern mehrteilig aus der Untersuchungsstrecke entnommen werden musste (Kapitel 9.6). Es besteht jedoch mindestens die Möglichkeit der genauen Untersuchung der Grenzflächen, um zum Beispiel einen erhöhten Porenanteil augenscheinlich festzustellen. Aus diesem Grund ist es zielführender, potenziell flächenhafte Substanzschädigungen im Radargramm visuell einzugrenzen und die örtlichen Verhältnisse durch eine gezielte Beprobung entweder direkt festzustellen oder als relevanten Punkt zu markieren, um eine spätere Beprobung, zum Beispiel im Zuge der Voruntersuchung einer Baumaßnahme, durchzuführen.

Eine Automatisierung birgt aus Sicht der Verfasser ein zu hohes Fehlerpotenzial, da die visuelle Charakteristik im Radargramm nicht eindeutig ist, wodurch der Mehrwert für eine systematische Auswertung nur eingeschränkt gegeben ist.

14.1.4 Erstellung von Datenexporten

Die Erstellung von Datenexporten ist grundsätzlich von der genutzten Softwarelösung abhängig und lässt sich nicht verallgemeinern. Im vorliegenden Anwendungsfall ermöglichte die genutzte Softwarelösung den Datenexport der ausgewerteten und interpretierten Georadar-Daten in tabellenkalkulatorische Software im CSV-Format. Für die Exportkonfiguration sind die für das Post-Processing ge-

Scan	Dist.(m)	AC D 2-Way Time	AC D Amplitude	AC D Depth(cm)	AC D Layer Vel.(cm/s)	AC D Layer Diel.
5	0	0,45	-369	2,84	12,65	5,62
20	1	0,45	-503,75	2,9	12,96	5,36
40	2	0,39	-638,5	2,57	13,27	5,11
60	3	0,37	-469	2,5	13,48	4,95
80	4	0,36	-508,5	2,43	13,32	5,07
100	5	0,38	-551	2,46	13,12	5,22
120	6	0,38	-392,5	2,5	13,16	5,19
140	7	0,39	-426	2,5	12,88	5,42
160	8	0,39	-404	2,51	12,88	5,42
180	9	0,41	-382	2,61	12,87	5,43
200	10	0,41	-317	2,56	12,63	5,63
220	11	0,41	-223	2,52	12,4	5,85
240	12	0,41	-134	2,58	12,46	5,79
260	13	0,42	-227	2,63	12,55	5,71
280	14	0,42	-213,5	2,55	12,23	6,01
300	15	0,4	-286	2,54	12,57	5,69

Bild 80: Beispielhafter Datenexport von Georadar-Daten mit spaltenweiser Zuordnung der Exportvariablen zur Nutzung innerhalb des Post-Processings

wünschten Informationen und Daten auszuwählen. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung der Georadarmessung sind dabei Daten zu Koordinaten, Markierungspunkten und Ortsbezügen sowie Informationen zu Schichtgrenzen von vordringlicher Bedeutung.

Das Ziel der Georadarmessung besteht mindestens in der Feststellung von Schichtgrenzen und vom Konstruktionsaufbau unter Verwendung eines Ortsbezugs. Somit ist mindestens die Tiefe der Schichtgrenze durch Angabe von Lagekoordinaten in der vertikalen Achse sowie in der Örtlichkeit zu exportieren, wobei letztere anhand von Encodern oder mittels GNSS gewonnen werden können. Alle weiteren Variablen sind optionale Daten, welche zu einem besseren Verständnis der Verhältnisse in der Straßensubstanz beitragen. Den Exportdateien sollte ein spezifisches Stationierungsraster zugeordnet werden, um eine gleichmäßige Verteilung der Messdaten über den gesamten Untersuchungsabschnitt zu gewährleisten. Als zweckmäßig wird in diesem Zusammenhang ein Rastermaß von einem Meter empfunden (Bild 80).

14.2 Prozessautomatisierung im Rahmen der straßenbautechnischen Interpretation

14.2.1 VBA-basierte Programmbausteine

Die Prozessautomatisierung der straßenbautechnischen Interpretation schließt sich an die dargelegte Automatisierung des Post-Processings an. Dabei wird das Ziel verfolgt, die exportierten Daten derartig aufzubereiten, dass eine ingenieurtechnische Nutzung mittels Tabellen und Planunterlagen ermöglicht wird. Im vorliegenden Anwendungsfall wurden dazu insgesamt zwölf Teilprozesse in Form von VBA-basierten Programmbausteinen (Visual Basic for Applications) konzipiert, welche mit dem

Bild 81: Eingabemaske zur Auswahl von Teilprozessen einer straßenbautechnischen Interpretation

tabellenkalkulatorischen Datenexport kompatibel sind und diesen direkt in einer entsprechen Softwarelösung weiterverarbeiten können. Hierbei gilt anzumerken, dass es sich um eine softwarespezifische Automatisierung handelt, welche nicht notwendigerweise auf weitere Softwarelösungen zur Interpretation von Georadar-Daten übertragbar ist. Es gilt ferner zu berücksichtigen, dass nicht alle Teilprozesse bei jeder straßenbautechnischen Interpretation zwingend durchzuführen sind, sondern im Einzelfall zur Optimierung des Datensatzes anzuwenden sind. Die Auswahl erfolgt dabei über eine allgemeine Eingabemaske (Bild 81).

Im Folgenden werden die einzelnen Programmbausteine näher erläutert:

1. Datenlücken vervollständigen („Lücken füllen“):

Die im Radargramm vorhandenen Schichtgrenzen werden mittels Picks interpretiert. Das Setzen der Picks erfolgt manuell und wird durch Vorgabe von Suchparametern definiert (Kapitel 3.4.2):

- Search Width: Anzahl an Scans, welche durch den Cursor abgesucht werden um einen Datenpunkt zu setzen (horizontale Suchfunktion).
- Single Point Search Length: Zulässige Entfernung zwischen der Cursorposition und einem Peak in der zeitlichen Abfolge eines Scans, um den Datenpunkt zu setzen (i. d. R. Nutzung des zur Cursorposition nächstgelegenen Peak) (vertikale Suchfunktion).
- Polarisation: Vorgabe der Polarisation, um die maßgebende Amplitude des Peaks zu

Dist.(m)	A	ACD	SMA	ACB	ACT	ACT	ACT
0	64,93		2,63	11,64	21,72		
1	64,05		2,96			31,32	
2	61,62		2,96	11,81	21,38	31,95	
3	60,08		2,96	11,98		31,64	
4	58,31		2,96	11,81	20,02	31,32	
5			3,3	11,64		31,32	
6	61,18		3,3	11,29	20,32	31,32	
7	62,06		3,64	11,29		30,7	
8				11,46	20,36	28,83	
9	63,17		2,96	10,6	20,36		
10	60,08		2,96		20,02	27,58	
11	60,96			12,24	20,36		
12			3,3	11,38	20,36	27,11	
13	60,74		3,3	11,29	20,7	27,11	
14				10,77	20,7	28,2	
15	60,96		2,96	10,95	20,7	27,89	
16	60,52			10,95	20,36		
17	60,08		2,96	10,09		28,2	

Bild 82: Beispielhafter Datenexport mit Lücken

definieren, in der der Pick gesetzt wird (positiv, negativ, absolut).

Durch die Vorgabe eines Stationierungsrasters beim Datenexport werden Datenpunkte innerhalb eines jeden Intervalls arithmetisch gemittelt und als projizierter Zwischenpunkt als neuer Messwert stationsgetreu ausgegeben. Ist kein Datenpunkt innerhalb eines Intervalls vorhanden, liegt keine Berechnungsgrundlage vor und es kann kein Messwert ausgegeben werden, sodass eine Lücke im Datenexport entsteht (Bild 82).

Zur Generierung eines vollständigen Datensatzes werden diese Datenlücken mittels linearer Interpolation aufgefüllt. Durch die Angabe einer maximalen Größe der Datenlücke, durch die entsprechende Angabe von aufeinanderfolgenden und zu füllenden Datenpunkten, wird verhindert, dass gewollte Datenlücken, zum Beispiel durch Ingenieurbauwerke, ebenfalls geschlossen werden.

2. Definition von Schichten im Konstruktionsaufbau im Volltext („Schichtnamen definieren“):

Die automatische Angabe der Gesamtdicke des gebundenen Oberbaus in Kombination mit der Einteilung in die korrespondierende Belastungsklasse der RStO setzt eine einheitliche Datenstruktur voraus. Diese Struktur unterliegt der Vergabe von Schichtbezeichnungen, welche einem bestimmten Bereich im Konstruktionsaufbau, zum Beispiel dem gebundenen Oberbau, zugeordnet sind. Durch Angabe von abweichenden Schichtbezeichnungen entstehen Zuordnungsfehler und die Schichten werden im Rahmen der Automatisierung nicht zugeordnet. Aus Gründen der Vereinfachung kann innerhalb der Auswertung mit Abkürzungen gearbeitet wer-

Bild 83: Maske zur Definition von Schichtbezeichnungen

den, welche durch diesen Teilprozess bei der Interpretation wieder in ingenieurtechnisch plausible und mit dem technischen Regelwerk konforme Bezeichnungen umgewandelt werden. Darüber hinaus wird eine spätere Anpassung von Bezeichnungen, zum Beispiel in Planunterlagen, vermieden (Bild 83).

3. Korrektur der Reihenfolge vorhandener Schichten im Konstruktionsaufbau („Schichtenreihenfolge“):

Die Reihenfolge der im Radargramm interpretierten und entsprechend nummerierten Schichtgrenzen wird im exportierten Datensatz beibehalten. Wenn im Radargramm zunächst die visuell besser interpretierbaren Schichtgrenzen unter fortlaufender Layernummerierung interpretiert wurden (Layer 1 = Asphalttragschicht), liegt eine Diskrepanz zwischen der interpretierten und der tatsächlichen Schichtenfolge vor. Dieses wird durch diese nachträgliche Anpassung korrigiert, sodass der exportierte Datensatz mit den örtlichen Verhältnissen übereinstimmt (Bild 84).

4. Einteilung der Gesamtmächtigkeit des gebundenen Oberbaus in die korrespondierende Belastungsklasse gemäß RStO sowie Zuordnung eines Farbcodes („Farbliche Bk Markierung“):

Anhand der dem gebundenen Oberbau zugeordneten Schichten wird die Gesamtdicke be-

Bild 84: Maske zur nachträglichen Bearbeitung der Schichtenfolge des Konstruktionsaufbaus

rechnet und mittels der in den RStO vorgegebenen Belastungsklassen klassifiziert. Dabei ist die Klasseneinteilung mittels der vorhandenen Bauweise zu treffen und die Klassenbreiten sind entsprechend der Vorgaben für die Gesamtdicke zu übernehmen. Durch die Auswahlfunktion „Tabelle füllen“, wird der Datensatz in ein abschließendes Datenblatt überführt, in der anhand der Klassenbreiten die Vergabe eines Farbcodes je Belastungsklasse erfolgt. Die Codierung ist dabei grundsätzlich frei wählbar (Tabelle 28).

5. Schnittfunktion („Schneiden“):

Bei der Schnittfunktion handelt es sich um einen zur Schnittfunktion in der Datenvorbereitung vergleichbaren Prozess (Kapitel 14.1.2). An dieser Stelle besteht allerdings die Möglichkeit der Festlegung der Schnittpunkte mittels der lokalen Stationierung anstelle der Auswahl anhand der Scans im Radargramm. Darüber hinaus wird mit diesem Tool das nachträgliche Schneiden eines gepickten und interpretierten Radargramms ermöglicht, da in der Softwarelösung selbst diese Funktion nicht vorhanden ist.

6. Anpassung von Messlängen („Kürzen“):

Durch Kurvenfahrten entstehen Längenabweichungen zwischen der Stationierung eines Un-

tersuchungsabschnitts und der Messlänge im Radargramm. Hintergrund ist der Bezug der Stationierung auf die Mittelachse des entsprechenden Straßenquerschnittes, während die Messlänge im Radargramm im Allgemeinen auf die Fahrstreifenmitte bezogen wird. Dadurch entstehen Längenunterschiede und das Radargramm bzw. der exportierte Datensatz bildet die örtlichen Verhältnisse nicht stationsgetreu ab (Kapitel 9.4). Da der Ortsbezug der Georadarmessung abschließend mit der Betriebskilometrierung der Untersuchungsstrecke (Bundesfernstraßen und Straßen mit überregionaler Verbindungsfunktion) bzw. an markanten Verhältnissen in der Örtlichkeit (Stadtstraßen) übereinstimmen muss, gilt es diese Längenunterschiede zu korrigieren. Dies erfolgt anhand der Anpassung der Messlänge im Radargramm an die Stationierung in der Örtlichkeit. Durch das Setzen von Markierungspunkten auf der Höhe von Beschilderungen und Stationszeichen können Bezugslängen im Radargramm generiert werden, die eine nachträgliche Korrektur des Ortsbezuges erleichtern.

In diesem Zusammenhang ist auch der Startpunkt der Georadarmessung festzulegen. Auf den meisten Untersuchungsabschnitten ist keine Möglichkeit des Einmessens in der Örtlichkeit gegeben, da die Georadarmessung im fließenden Verkehr stattfindet. Es ist daher ein fliegender Start von Nöten, welcher allerdings die Definition eines Startwertes erschwert. Daher ist durch einen Markierungspunkt im Radargramm der Startwert festzulegen. Dieser sollte mittels der Betriebskilometrierung oder markanten Verhältnisse in der Örtlichkeit gesetzt werden. Mit dem Teilprozess „Stationierung“ ist dieser Start-

Bild 85: Maske Angabe der Betriebskilometrierung als Startwert der Georadarmessung

wert mit der Betriebskilometrierung der Untersuchungsstrecke in Einklang zu bringen (Bild 85).

7. Verortung von Entnahmestellen („Bohrkerne eingeben“):

Zur Verortung der Bohrkernentnahmestellen im Datensatz und in den Ausgabedokumenten, wie Tabellen und Planunterlagen, werden diese sowohl durch Angabe des zurückgelegten Weges als Abstand zum Startwert als auch durch die Angabe der Betriebskilometrierung verortet (Bild 86).

8. Definition des Soll-Aufbaus („Sollaufbau“):

Es besteht die Option der Definition eines Sollaufbaus für den gebundenen Oberbau oder den Gesamtoberbau in den Planunterlagen. Dieser wird in der vorgegebenen Tiefe als Bezugshorizont generiert und dient als Anhaltspunkt für unterdimensionierte Bereiche.

9. Generierung von Bezugshorizonten („Fräslinie“):

Neben der Definition eines Sollaufbaus können weitere Bezugshorizonte in den Planunterlagen in unterschiedlichen Tiefen und unterschiedlichen Längen generiert werden. Diese dienen zur Einschätzung der Dicke einzelner Schichten im Konstruktionsaufbau und können zum Beispiel als Abschätzung für Fräshorizonte genutzt werden.

10. Diagrammerstellung und Anpassung von Diagrammelementen („Diagrammoptionen“):

Die Diagrammoptionen dienen der Generierung von Ausgabedokumenten und Planunterlagen zur Visualisierung der exportierten Geo-

Bild 86: Maske zur Eingabe und Verortung von Bohrkernentnahmestellen im Datensatz

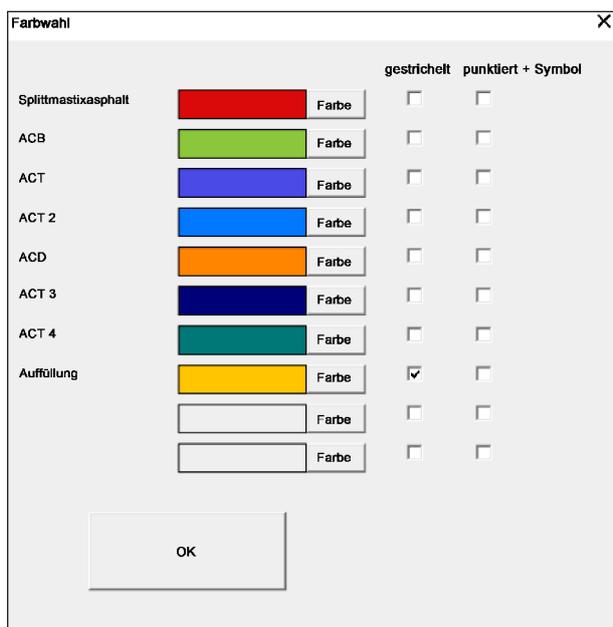


Bild 87: Maske zur Linienformatierung im Längsprofil und Tiefenschnitt

radar-Daten. Der Konstruktionsaufbau wird in diesem Zusammenhang im Längsprofil und Tiefenschnitt entlang der aufgenommenen Messlinien abgebildet. Zur Veranschaulichung und Orientierung werden jeder Schichtgrenze bestimmte Linienformatierungen aus Farbcode und Strichtyp zugeordnet (Bild 87).

- Erstellung von Wertetabellen korrespondierend zu Diagrammen:

Der exportierte Datensatz wird nach Abschluss aller durchgeführten Teilprozesse in einem abschließenden Datenblatt als Schichtenverzeichnis dargestellt. Dieses umfasst die Einteilung der Belastungsklassen zuzüglich der definierten Farbcodes sowie alle Messwerte der interpretierten Schichtgrenzen im Einzelnen und im arithmetischen Mittel. Die abschließende Darstellung des Schichtenverzeichnisses ist in Bild 66 visualisiert.

14.2.2 Berechnung homogener Abschnitte

Im vorliegenden Anwendungsfall wurden drei Homogenitätskriterien entwickelt, um einen Untersuchungsabschnitt in homogene Abschnitte einzuteilen. Die entsprechenden Definitionen sind in Kapitel 8.3 aufgeführt.

Eine Automatisierung der Ermittlung von homogenen Abschnitten kann nur auf Grundlage quantitati-

ver Messdaten erfolgen, welche ausschließlich auf das erste der entwickelten Homogenitätskriterien „Verlauf der dimensionierungsrelevanten Asphaltgrenze“ zutrifft. Im Zuge dessen wird der Untersuchungsabschnitt in Auswerteabschnitte der Länge $L = 20$ Meter eingeteilt. Zu jedem Auswerteabschnitt wird das arithmetische Mittel der Asphaltgrenze als Maß für die Dicke des gebundenen Oberbaus ermittelt. Das Homogenitätskriterium definiert einen gleichartigen Zustand zwischen benachbarten Auswerteabschnitten, sofern sich die Gesamtdicke des gebundenen Oberbaus um weniger als $\pm 20,0\%$ verändert oder die Abweichung der Gesamtdicke des betrachteten Auswerteabschnitts kumulativ mit den Abweichungen aller vorherigen Auswerteabschnitte weniger als $\pm 20,0\%$ beträgt.

Die Berechnung der homogenen Abschnitte erfolgt in tabellenkalkulatorischer Software und ist damit grundsätzlich programmierfähig. Ein Beispiel bezüglich der abschließenden datenseitigen Darstellung ist im Längsprofil in Bild 68 dargestellt.

15 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Anwendungsfall wurden Versuchsprogramme auf einer idealisierten Objekt- und der Netzebene durchgeführt, um die Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen des Georadarverfahrens zu eruieren. Mittels theoretisierter Grundlagenforschung sowie Anwendungen im realen Praxisfall wurde in diesem Zusammenhang das Ziel verfolgt, Ansätze für die zweckmäßige Festlegung von messtechnischen Eingangsgrößen darzulegen und Potenziale für die Standardisierung und Automatisierung der Datenauswertung aufzuzeigen.

Dabei hat das Versuchsprogramm der Objektebene gezeigt, dass Messfrequenzen kleiner als 1.000 MHz aufgrund des geringen vertikalen Auflösungsvermögens zu unbefriedigenden Ergebnissen in der Darstellung von Schichtgrenzen in den Radargrammen und in der Auflösung des gebundenen Oberbaus führen. Dies ist grundsätzlich auf die Überlagerung der Reflexionen der Schichtgrenzen zurückzuführen, sodass diese mit abnehmender Messfrequenz zunehmend schlechter auszuwerten und zu interpretieren sind. Die größere Detektionstiefe liefert zudem keinen nennenswerten Mehrwert für die Analyse und Bewertung der Asphaltbefestigung.

Das vertikale Auflösungsvermögen des Georadars unterliegt darüber hinaus einer Beschränkung durch die Wahl der Impulsdauer und wird ferner durch die elektromagnetischen Eigenschaften der zu untersuchenden Medien beeinflusst. Hierbei ist insbesondere die relative Permittivität von Bedeutung. Beide Größen sind maßgebend für die getrennte Darstellung übereinanderliegender und horizontal verlaufender Reflektoren. Der rechnerische Zusammenhang ist in (3.16) dargelegt. Darüber hinaus liegt eine verfahrenstechnische Grenze durch die Abhängigkeit zu der genutzten Messfrequenz und der korrespondierenden Wellenlänge nach (3.9) und (3.10) vor, um auch dünnere Schichten im Konstruktionsaufbau aufzulösen. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde dieser Sachverhalt durch die Herstellung von Asphaltdeckschichten der Dicke $d = 2,5$ cm (Belastungsklasse Bk3,2) und $d = 4,0$ cm (Belastungsklasse Bk100) aufgegriffen. Anhand der Georadar-Daten wurde dabei ersichtlich, dass mittels des gewählten Messsystems respektive der gewählten Messfrequenzen von bis zu 2.000 MHz diese nicht erkannt bzw. aufgelöst werden konnten. Dadurch liegt an dieser Stelle ein erhebliches Risikopotenzial für Fehlinterpretationen vor, welches durch die dargelegten empirischen Messdaten verdeutlicht werden konnte. Somit ist in diesem Zusammenhang die Notwendigkeit der Entnahme von Bohrkernen hervorzuheben, sodass die Dicke der Asphaltdeckschicht in situ festgestellt und als Interpretationsgrundlage für die Georadar-Daten genutzt werden kann. Der wesentliche Einfluss ist hierbei der Messfrequenz zuzuschreiben, da höhere Messfrequenzen kleinere Wellenlängen aufweisen und somit dünnere Schichten detektieren können. Um dünne Schichten zu erkennen und zu interpretieren, sind somit Messfrequenzen von $f > 2.000$ MHz zu empfehlen.

Durch die eingeschränkte Auflösung und Erkennbarkeit im Radargramm und den damit zu erwartenden Fehlinterpretationen besteht das Risiko, dass Abweichungen in der Signallaufzeit und damit in der relativen Permittivität für die Asphaltdeckschicht sowie in der Angabe der Tiefe der Schichtgrenze ermittelt und ausgegeben werden. Die durchgeführten Auswertungen haben gezeigt, dass diese bei einer Gesamtdicke von näherungsweise 4,0 cm im Bereich der Belastungsklasse Bk100 bis zu 50,0 % betragen können. Die korrespondierenden Streuungen der Signallaufzeiten als lokale Peaks betragen ebenfalls bis zu 50,0 % der zu erwartenden Signallaufzeit.

Im Zuge der Detektion von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen konnte anhand der Versuchsprogramme gezeigt werden, dass sich quer zur Messrichtung verlaufende Substanzmerkmale und Substanzschädigungen im Radargramm durch Diffraktionshyperbeln abbilden lassen. Diese stellen allerdings ein allgemeingültiges visuell feststellbares Charakteristikum dar und lassen dadurch keine Rückschlüsse auf die Art der Schädigung oder des Merkmals zu. Zudem konnte festgestellt werden, dass aus Darstellungsgründen Scanraten von mindestens 20 Scans/m zweckmäßig sind, um entsprechende Diffraktionshyperbeln ausreichend darzustellen.

Eine wesentliche Einsatzgrenze des Georadarverfahrens ist die unmögliche direkte Ansprache der Straßensubstanz. Da es sich in der Regel um ein Pulse-Echo-Verfahren handelt, wird aufgrund der elektromagnetischen Eigenschaften und dem Reflexionsverhalten der abgestrahlten Impulse an Schädigungen und Grenzflächen auf Objekte und Strukturen in der Straßensubstanz indirekt geschlossen. Sofern es durch die Fragestellung und Zielsetzung der Georadarmessung gefordert ist, benötigt das Messverfahren daher zusätzliche Datensätze und Informationen, um die Straßensubstanz quasiflächig zu erfassen und eine umfängliche Interpretation durch das auswertende Personal zu ermöglichen. Zu diesen ergänzenden Datensätzen zählen insbesondere:

- Video- und Bildmaterial zu der Straßenoberfläche
- Bauakten und Unterlagen zur Erhaltungsgeschichte sowie zur messtechnischen ZEB
- Aufbaudaten aus Beprobungen

Als Fragestellungen zählen dabei insbesondere eine schichtspezifische Betrachtung des Konstruktionsaufbaus sowie die gezielte Feststellung und Benennung von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen. Sofern die Fragestellung und Zielsetzung der Georadarmessung ausschließlich die Feststellung des Konstruktionsaufbaus durch die Angabe der Anzahl und des Verlaufs der vorhandenen Schichten besteht, ist aus Sicht der Verfasser eine Beprobung nicht zwingend erforderlich. Sofern die qualitative Bewertung des Konstruktionsaufbaus Bestandteil der Fragestellung oder eine materialtechnologische Ansprache der vorhandenen Schichten gefordert ist, ist eine Probennahme und damit auch eine Kalibrierung der Georadar-Daten

zwingend erforderlich. Vor allem im Zuge der Vorkundung zu Baumaßnahmen sollte diese anhand von Bohrkernproben und mittels Rammkernbohrungen für den ungebundenen Oberbau erfolgen, da die stoffliche Zusammensetzung einzelner Schichten erhebliche Auswirkungen auf den Bauablauf, die Bauverfahren und die allgemeine Bauplanung haben kann.

Im Zuge der direkten Benennung von Substanzmerkmalen oder Substanzschädigungen führt dies allerdings dazu, dass neben Kalibrierbohrkernen weitere Bohrkernkerne entnommen werden müssen. Es bietet sich dabei an, diese zusätzlichen Bohrkernkerne nach Möglichkeit ebenfalls zu Kalibrierzwecken zu nutzen, sofern der Zustand der jeweiligen Schichten eine regelwerkskonforme Bestimmung zulässt. Dadurch ergeben sich zusätzliche Werte für die Tiefe von Schichtgrenzen, aus denen die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Impulse in den jeweiligen Schichten sowie die entsprechende relative Permittivität ermittelt werden können. Dabei ist es unerheblich, ob das gesamte Profil oder nur einzelne Schichten gemessen werden können. Jeder zusätzliche Wert stellte eine Verbesserung der Datenlage dar und trägt zur höheren Genauigkeit der Wiedergabe des Konstruktionsaufbaus und der Struktur der Straßensubstanz bei. Diese Herangehensweise ist sowohl auf der Objektebene als auch auf Netzebene zu empfehlen.

Im Zuge der Quantifizierung der relativen Permittivität als wesentlicher Materialparameter hat die im vorliegenden Anwendungsfall durchgeführte Studie keine konkrete Quantifizierung zugelassen. Vielmehr wurde deutlich, dass die materialtechnologischen Einflüsse derart groß sind, dass ausschließlich die Angabe von Wertespanssen innerhalb einer als homogen und isotrop definierter Asphalttschicht möglich ist. Grundsätzlich konnte die Wertespanne der relativen Permittivität für trockenen Asphalt der einschlägigen Literatur durch den vorliegenden Anwendungsfall bestätigt werden. Zudem konnte durch deskriptive Statistiken eine zusätzliche Eingrenzung vorgenommen werden, sodass im vorliegenden Anwendungsfall ein Wertebereich zwischen 6,20 und 7,20 ermittelt werden konnte.

Durch die Nutzung des Georadarverfahrens kann die Straßensubstanz und der Konstruktionsaufbau eines Untersuchungsabschnitts allgemein erkannt und mit Berücksichtigung einer im vorliegenden Anwendungsfall festgestellten Unsicherheit von näherungsweise $\pm 2,5$ cm wiedergegeben werden. Der

wesentliche Mehrwert des Verfahrens ist in diesem Zusammenhang die Möglichkeit der Feststellung von Aufbauwechsellern und daraus abgeleitet die Bildung von homogenen Abschnitten anhand des Konstruktionsaufbaus. In Kombination mit der messtechnischen ZEB steht dadurch auf der Netzebene ein weiteres Tool zu Verfügung, eine Einteilung des Netzes, zum Beispiel vor dem Hintergrund der Erhaltungsplanung, vorzunehmen. In Bezug auf die Beprobung eines Untersuchungsabschnitts ist darüber hinaus eine Reduzierung der zu entnehmenden Bohrkernkerne zu erwarten sowie eine gezieltere Verortung der Entnahmestellen, um beispielsweise auch potenziell geschädigte Bereiche zu beproben. Insgesamt wird dadurch der Informationsgehalt für das Anlagensystem „Straße“ erhöht, da Aufbaudaten quasikontinuierlich gewonnen werden und mit weiteren Datensätzen, zum Beispiel Verkehrsdaten etc., verschnitten werden können. Ein Beispiel für die Verschneidung von Georadar und messtechnischer ZEB sowie von Verkehrsdaten wurde durch den Forschungsnehmer dargelegt.

Substanzmerkmale und Substanzschädigungen, welche in Messrichtung der Georadarmessung verlaufen, wie unzureichender Schichtenverbund, sind als unabhängig von der Scanrate und von den relativen Permittivitäten der ober- und unterhalb der betroffenen Grenzfläche befindlichen Schichten im Radargramm zu charakterisieren. Dabei ist allerdings ein Kompromiss zwischen der Datendichte und der Darstellung im Radargramm einzugehen. Unzureichender Schichtenverbund kann ausschließlich anhand abweichender Wellenmuster im O-Scope erkannt werden, da er technisch mit einer Schichtgrenze zusammenfällt. Die Auswertungen haben hierbei allerdings keine eindeutigen Ergebnisse aufgezeigt. Es konnten im vorliegenden Anwendungsfall ausschließlich Tendenzen in Bezug auf mögliche Wellenmuster aufgezeigt werden. Es erscheint somit erforderlich in den entsprechenden Bereichen des Radargramms bzw. des Untersuchungsabschnitts repräsentative Bohrkernkerne zu entnehmen, um den Schichtenverbund visuell festzustellen. Die an der Entnahmestelle vorherrschenden Charakteristika im O-Scope können daraufhin als Vorlage für den im Radargramm als gleichartig angesehenen Bereich genutzt werden. Auf diese Weise können Bereiche mit unzureichendem Schichtenverbund in der Fläche eingegrenzt werden.

Im Rahmen des auf der Objektebene durchgeführten Versuchsprogramms wurde eine Reihe von

Messunsicherheiten und Messabweichungen aufgezeigt, welche teilweise quantifizierbar und teilweise auf das Processing und Post-Processing zurückzuführen waren. In diesem Zusammenhang ist vor allem die manuelle Auswertung und Interpretation von Georadar-Daten von Bedeutung, da diese erhebliches Fehlerpotenzial beinhaltet.

Es konnte anhand der Wiederholungsmessungen auf der Objektebene festgestellt werden, dass das Picken und damit das direkt zugeordnete Messdatum Signallaufzeit einer gewissen Messunsicherheit unterliegt. Somit sind die ebenfalls daraus resultierenden Berechnungen zur relativen Permittivität und zur Tiefe der gepickten Schichtgrenze gleichermaßen fehlerbehaftet. Die Qualität der Auswertung hängt somit maßgeblich von der Qualität und Vorgehensweise beim Picken der Schichtgrenzen ab. Der in diesem Zusammenhang auftretende Eingangsfehler der Signallaufzeit konnte als zufällige Messunsicherheit bewertet werden.

Schichtgrenzen werden im Radargramm grundsätzlich anhand von Picks definiert. Der Vorgang unterliegt softwaretechnischen Parametern und setzt straßenbautechnisches Verständnis beim auswertenden Personal voraus. Da es zum aktuellen Zeitpunkt in Bezug auf die Auswertung noch keine einheitlichen Standards gibt, ist darüber hinaus zum aktuellen Zeitpunkt keine einheitliche Vorgehensweise im Processing und Post-Processing vorhanden. Dadurch wird die Bewertung der Qualität einer Georadmessung sowie des entsprechenden Messergebnisses erheblich erschwert. Somit ist jede Georadmessung zum aktuellen Zeitpunkt als Einzelfall zu betrachten, welcher spezifischen Rahmenbedingungen unterliegt, die maßgebenden Einfluss auf die Definition und Quantifizierung von messtechnischen Größen sowie auf die Art und den Umfang des Processings haben.

16 Zukünftiger Forschungsbedarf

Die Zielsetzung des Forschungsprojektes war es, anhand zweier Versuchsprogramme die Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen des Georadarverfahrens gemäß des derzeitigen Stands der Technik zu eruieren. Dabei standen die potenziell erzielbare Genauigkeit in der Wiedergabe von Schichtgrenzen in der Straßensubstanz sowie die Erkennung von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen im Vordergrund. Mittels objekt- und

netzbezogener Untersuchungen wurden in diesem Zusammenhang visuell feststellbare Charakteristika sowie potenzielle Korrelationen zu elektromagnetischen Eigenschaften eruiert. Darüber hinaus wurden die Potenziale automatisierter Bausteine in der Datenauswertung und Dateninterpretation untersucht. Das Forschungsprojekt bezog sich dabei ausschließlich auf den Anwendungsfall Asphaltbauweise außerorts.

Im Zuge der Bearbeitung der Forschungsfrage und der Zielsetzung des Forschungsprojektes eröffneten sich neue Ansätze und Fragestellungen, welche aus Sicht der Verfasser im Zuge von zukünftigen Forschungsarbeiten zu untersuchen sind:

1. Vor dem Hintergrund der Nutzbarkeit des Georadarverfahrens wurde in Kooperation mit der Heller Ingenieurgesellschaft mbH ein Ansatz für eine Verschneidung des Verfahrens mit der messtechnischen ZEB dargelegt (Kapitel 12.3). Es gilt im Zuge einer Systematisierung des Verfahrens einheitliche Standards zu erarbeiten, um beide Messverfahren systematisch miteinander korrelieren zu können. Insbesondere sind in diesem Zusammenhang die Art und die Formatierung des Messergebnisses der Georadar-Daten zu erarbeiten. Dabei ist auch die mögliche Verankerung des Georadar-Verfahrens in einem Geoinformationssystem (GIS) durch die Generierung von Streckenbändern in Form von Web Map Services (WMS) oder Web Feature Services (WFS) zu untersuchen.
2. Im Zuge der Abschätzung der visuellen Charakteristika wurden im vorliegenden Anwendungsfall grundsätzliche Darstellungen aufgeführt, um Strukturen in der Straßensubstanz zu erkennen. Dabei wurde in Bezug auf quer zur Messrichtung verlaufende Merkmale und Schädigungen auf die Mindestgröße von Schädigungen hingewiesen, damit diese nach aktuellem Stand der Technik detektierbar sind. Hierbei steht eine gezielte Korrelation zwischen der Größe des Substanzmerkmals oder der Substanzschädigung und der Größe der entsprechenden Diffraktionshyperbel im Radargramm aus. Durch die gezielte Untersuchung dieses Sachverhalts besteht die Möglichkeit, anhand der Hyperbel auf die Größe des Merkmals oder der Schädigung zu schließen.
3. Für Substanzschädigungen, welche in Messrichtung des Georadars verlaufen, sollte vor

- dem Hintergrund der Erkenntnisse zur Feststellung von unzureichendem Schichtenverbund durch die visuelle Abgrenzung im Radargramm eine systematische Untersuchung von Wellenmustern erfolgen. Anhand der dargelegten Auswertungen liegen dazu aktuell ausschließlich Tendenzen vor, welche es aufzugreifen und weiter zu untersuchen gilt. Dies könnte zukünftig eine potenzielle Ergänzung zu den etablierten Verfahren zur Bildung von Untersuchungsabschnitten bzw. homogenen Abschnitten darstellen.
4. Vor dem Hintergrund der Verankerung des Georadarverfahrens im Bauvertrag bzw. in Bezug auf die Nutzung des Verfahrens als Tool in der Qualitätssicherung von Baumaßnahmen sind die Definition von einheitlichen nationalen Standards bei der Durchführung einer Georadarmessung sowie in der Angabe des Messergebnisses von fundamentaler Bedeutung und zwingend notwendig. Darüber hinaus sind Systematisierungen in der Festlegung und Definition der messtechnischen Eingangsgrößen zu treffen, um eine Vergleichbarkeit verschiedener Messsysteme zu ermöglichen.
 5. Die Konzeptionierung automatisierter Auswertungen hat Ansätze gezeigt, wie einheitliche Vorgehensweisen in der Auswertung und Interpretation von Georadar-Daten implementiert werden können. Dies würde zu einer Standardisierung des Messverfahrens beitragen und darüber hinaus den Unsicherheitsfaktor der manuellen Auswertung und Interpretation von Radargrammen verringern. Die dargelegten Messunsicherheiten und Abweichungen im Messergebnis könnten in diesem Zusammenhang ebenfalls verringert werden. Es gilt die Automatisierung der Auswertung fortzusetzen, um einheitliche Standards für die Durchführung einer Georadarmessung sowie für die Auswertung und Interpretation der Georadar-Daten zu definieren. Hierbei ist gleichermaßen ein Vergleich der verschiedenen am Markt befindlichen Messsysteme sowie Softwarelösungen vorzunehmen, sodass kompatible Bausteine entwickelt werden.
 6. Die dargelegten Forschungsergebnisse beziehen sich auf den Anwendungsfall Asphaltbauweise – außerorts und sind im Zuge weiterer Messreihen für eine vollumfängliche Betrachtung auf die Bereiche der Betonbefestigungen und ungebundener Oberbau auszuweiten.
 7. Vor dem Hintergrund der systematischen Detektion von Substanzschädigungen ist eine Untersuchung unter Verwendung von neuronalen Netzen denkbar, um Diffraktionshyperbeln systematisiert in Georadar-Daten zu erkennen. Dabei sollte zunächst eine Abschätzung und Untersuchung hinsichtlich der grundsätzlichen Herangehensweise und Umsetzung im Vordergrund stehen [AL-NUAIMY et al., 2000].

Literatur

- AL-NUAIMY, W.; HUANG, Y.; NAKHKASH, M.; FANG, M.; NGUYEN, V.; ERIKSEN, A. (2000): Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition, *Journal of Applied Geophysics*, Jhrg. 43 (Nr. 2 – 4), S. 157-165.
- AL-QADI, I. L.; LAHOUAR, S. (2005): Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice, *Construction and Building Materials*, Jhrg. 19 (Nr. 10), S. 763-772.
- AL-QADI, I. L.; LAHOUAR, S.; LOULIZI, A. (2003): Successful Application of Ground-Penetrating Radar for Quality Assurance-Quality Control of New Pavements, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Jhrg. 1861, S. 86-97.
- AL-QADI, I. L.; LAHOUAR, S.; LOULIZI, A. (2005): Ground-Penetrating Radar Calibration at the Virginia Smart Road and Signal Analysis to Improve Prediction of Flexible Pavement Layer Thicknesses, FHWA/VTRC 05-CR7, Blacksburg, Virginia.
- AL-QADI, I. L.; LENG, Z.; LAKIN, A. (2011): In-Place Hot Mix Asphalt Density Estimation Using Ground Penetrating Radar, ICT Report No. 11-096, Urbana, Illinois.
- ALTEKÖSTER, C. A. (2004): Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit von Bodenradarmessungen, Dissertation, Bonn.
- AMER-YAHIA, C.; MAJIDZADEH, T. (2006): Proceedings of the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, Use of Ground Penetrating Radar for Quality Control Measurement on New Asphalt Overlays, Columbus.
- ANNAN, A. P. (2003): *Ground Penetrating Radar, Principles, Procedures & Applications*, Handbook, Mississauga, Kanada.
- ANNAN, A. P. (2011): Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar, in: JOL, H. M. (Hrsg.): *Ground penetrating radar, Theory and applications*, Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands.
- ASTM International (2010): E17 Committee – Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar (D4748-10), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM International (2011): D18 Committee – Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation (D6432-11), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- CASSIDY, N. J. (2011): Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids, in: JOL, H. M. (Hrsg.): *Ground penetrating radar, Theory and applications*, Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands.
- CHEN, D.-H.; SCULLION, T. (2007): Forensic investigations of roadway pavement failures, TRB 86th Annual Meeting, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
- CHEN, D.-H.; HONG, F.; ZHOU, W.; YING, P. (2014): Estimating the hotmix asphalt air voids from ground penetrating radar, *NDT & E International*, Jhrg. 68, S. 120-127.
- DANIELS, D. J. (2007): *Ground Penetrating Radar*, 2. Ed, Bd. 1, Institution of Engineering and Technology, London.
- DE LOOR, G. P. (1983): The Dielectric Properties of Wet Materials, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Jhrg. GE-21 (Nr. 3), S. 364-369.
- Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (2008): Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (M B 10), Ausgabe Februar 2008, überarbeitete Fassung, Merkblatt/DGZfP-Fachausschuss für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, DGZfP, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1995): *Grundlagen der Messtechnik Teil1: Grundbegriffe (DIN 1319-1)*, Beuth Verlag, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1996): *Grundlagen der Messtechnik Teil3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße – Messunsicherheit (DIN 1319-3)*, Beuth Verlag, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2003): *Prüfverfahren für Heiasphalt – Bestimmung der Dicke von Fahrbahnbefestigungen aus*

- Asphalt (DIN EN 12697-36), Beuth Verlag, Berlin.
- DONG, Z.; YE, S.; GAO, Y.; FANG, G.; ZHANG, X.; XUE, Z.; ZHANG, T. (2016): Rapid Detection Methods for Asphalt Pavement Thicknesses and Defects by a Vehicle-Mounted Ground Penetrating Radar (GPR) System, *Sensors*, Jhrg. 16 (Nr. 12), S. 2067.
- DONNEVERT, J. (2015): Die Maxwell'schen Gleichungen, Vom Strömungsfeld des Gleichstroms zum Strahlungsfeld des Hertz'schen Dipols, Springer Vieweg, Wiesbaden.
- EDWARDS, L.; MASON, Q. S. (2011): Evaluation of Nondestructive Methods for Determining Pavement Thickness, Vicksburg, Mississippi.
- ENDOM, J.; FÖRSTER, M.-O.; JOHANNSEN, K. (2008): Ein Blick in die Straße, Stand der Anwendung des Georadars im Straßenbau, *Schriftenreihe tis. Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau*, (Nr. 9).
- EVANS, M.A. (2005): Use Of Ground Penetrating Radar In A Pavement Management System, Arkansas.
- EVANS, R. D. (2009): Optimising Ground Penetrating Radar (GPR) to Assess Pavements, Thesis, Loughborough, United Kingdom.
- FERNANDES, F.M.; FERNANDES, A.; PAIS, J. (2017): Assessment of the density and moisture content of asphalt mixtures of road pavements, *Construction and Building Materials*, Jhrg. 154, S. 1216-1225.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2000): Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, FGSV-Nr. 926/1, FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2001): Arbeitspapier Zustandserfassung und -bewertung (AP9 M2), FGSV-Nr. 490, FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2001): Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Stra 01), FGSV-Nr. 988, FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2007): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (ZTV SoB-StB), FGSV-Nr. 698, FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2008): Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB), FGSV-Nr. 756, FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2009): Arbeitspapier Grundlagen zur Ermittlung homogener Abschnitte zur Bewertung der strukturellen Substanz von Straßenbefestigungen, FGSV-Nr. 431, FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2009): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN), FGSV-Nr. 121, FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2011): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen (ZTV ZEB-StB), FGSV-Nr. 489, FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012): Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe (M BGriff), FGSV-Nr. 401, FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO), FGSV-Nr. 499, FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012): Technische Prüfvorschriften zur Bestimmung der Dicken von Oberbauschichten im Straßenbau (TP D-StB), FGSV-Nr. 774, FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2013): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächen-

- befestigungen aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB), FGSV-Nr. 799, FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2016): Arbeitspapier Anwendung des Georadars zur Substanzbewertung von Straßen, FGSV-Nr. 443 A, FGSV Verlag, Köln.
- FÖRSTER, M.-O.; HOTHAN, J. (2001): Gültigkeit der mit dem „Ground Penetration Radar“ (GPR) ermittelten Schichtdicken von Straßenbefestigungen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Nr. 826, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn.
- FUNK, T.; KRETZ, R.; LINDNER, T.; Wilmers, W. (1996): Zerstörungsfreie Untersuchung des Straßenaufbaus mit dem Impulsradar, Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Deutschland.
- Geophysical Survey Systems, INC. (2015a): Handbook for GPR Inspection of Road Structures, Data Analysis Performed in RADAN 6, Nashua, New Hampshire.
- Geophysical Survey Systems, INC. (2015b): RADAN® 7 Manual, Handbuch, Nashua, New Hampshire.
- Geophysical Survey Systems, INC. (2015c): SIR 20 Manual, Handbuch, Nashua, New Hampshire.
- Geophysical Survey Systems, INC. (2015d): SIR 30 Manual, Handbuch, Nashua, New Hampshire.
- GOLKOWSKI, G. (2003): Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, H. 31, Verlag für Neue Wissenschaften, Bremerhaven.
- HÄNNINEN, P. (1992): Application of ground penetrating radar and radio wave moisture probe techniques to peatland investigations, With 7 tables, Bulletin/Geological Survey of Finland, Nr. 361, Espoo.
- HARRIS, D.; NOURELDIN, A. S.; SHAN, J. (2004): Pavement overlay thickness estimation using Ground Penetrating Radar (GPR), ASPRS Annual Conference, Denver.
- HENTSCHEL, K. (2001): Das Brechungsgesetz in der Fassung von Snellius, Archive for History of Exact Sciences, Jhrg. 55 (Nr. 4), S. 297-344.
- HOFMANN, H.; SPINDLER, J.; FISCHER, H. (2007): Werkstoffe in der Elektrotechnik, Grundlagen – Aufbau – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung – Technologie, 6., neu bearb. Aufl., Hanser Verlag, München.
- HUGENSCHMIDT, J. (2009): Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung), Forschungsauftrag VSS 2005/701 auf Antrag des Schweizerischen Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich.
- HURAY, P. G. (2011): Maxwell's equations, Wiley IEEE Press; IEEE Xplore, Hoboken, New Jersey.
- HUTSCHENREUTHER, J.; WÖRNER, T. (2010): Asphalt im Straßenbau, 2. Aufl., Kirschbaum, Bonn.
- International Organization for Standardization/ Technical Management Board ISO/TMBG (2008): Uncertainty of measurement – Part3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO/IEC Guide 98-3, Beuth Verlag, Berlin.
- KHAMZIN, A. K.; VARNAVINA, A. V.; TORGA-SHOV, E. V.; ANDERSON, N. L.; SNEED, L.H. (2017): Utilization of air-launched ground penetrating radar (GPR) for pavement condition assessment, Construction and Building Materials, Jhrg. 141, S. 130-139.
- KILIAN, U.; WEBER, C. (Hrsg.) (2003): Lexikon der Physik, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, Neckar.
- KUCHLING, H. (2007): Taschenbuch der Physik, 19., aktualisierte Aufl., Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., München.
- LAHOUAR, S. (2003): Development of Data Analysis Algorithms for Interpretation of Ground Penetrating Radar Data, Dissertation, Blacksburg, Virginia.
- LOIZOS, A.; PLATI, C. (2007): Accuracy of pavement thicknesses estimation using different

- ground penetrating radar analysis approaches, NDT & E International, Jhrg. 40 (Nr. 2), S. 147-157.
- LOULIZI, A.; AL-QADI, I. L.; LAHOUAR, S. (2003): Optimization of Ground-Penetrating Radar Data to Predict Layer Thicknesses in Flexible Pavements, Journal of Transportation Engineering, Jhrg. 129 (Nr. 1), S. 93-99.
- MAERSCHALK, G.; SOCINA, M. (2008): Weiterentwicklung der Bewertung des Pavement Management Systems (PMS) um ein Verfahren für die Umsetzung von Qualitätszielen; Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 09.136/2004/MRB des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Forschung Strassenbau und Straßenverkehrstechnik, Nr. 1001, Verlag für neue Wissenschaften, Bremerhaven.
- MANACORDA, G.; PERSICO, R.; SCOTT, H. F. (2015): Design of Advanced GPR Equipment for Civil Engineering, in: Benedetto, A.; PAJEWSKI, L. (Hrsg.): Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar, Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering, Springer Verlag, Cham.
- MARINESCU, M. (2012): Elektrische und magnetische Felder, Eine praxisorientierte Einführung, 3. bearbeitete Auflage, Springer, Berlin.
- MASER, K.; CARMICHAEL, A. (2015): Ground Penetrating Radar Evaluation of New Pavement Density, Infrasense Inc. (Hrsg.), Final Report, WA-RD 839 1, Washington, D.C.
- MOREY, R. M. (1998): Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities, [a synthesis of highway practice], National cooperative highway research program Synthesis of highway practice, Nr. 255, National Academy Press, Washington, D.C.
- NÚÑEZ-NIETO, X.; SOLLA, M.; LORENZO, H. (2015): Applications of GPR for Humanitarian Assistance and Security, in: Benedetto, A.; Pajewski, L. (Hrsg.): Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar, Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering, Springer Verlag, Cham.
- PAJEWSKI, L.; TOSTI, F.; KUSAYANAGI, W. (2015): Antennas for GPR Systems, in: BENEDETTO, A.; PAJEWSKI, L. (Hrsg.): Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar, Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering, Springer Verlag, Cham.
- PLASSMANN, W.; SCHULZ, D. (Hrsg.) (2016): Handbuch Elektrotechnik, 7., neu bearbeitete Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.
- QUINTUS, H. L. (2009): NDT technology for quality assurance of HMA pavement construction, NCHRP report, Nr. 626, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- RAMOS, A.; LAZARO, A.; GIRBAU, D.; Villarino, R. (2016): RFID and wireless sensors using ultrawideband technology, Remote identification beyond RFID set, ISTE Press and Elsevier Announce Publishing Alliance, London.
- REYNOLDS, J. M. (2005): An introduction to applied and environmental geophysics, Reprint, Wiley, Chichester.
- REYNOLDS, J. M. (2011): An introduction to applied and environmental geophysics, 2nd ed., Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex.
- SAARENKETO, T. (2009): Measuring electromagnetic properties of asphalt for pavement quality control and defect mapping, Saarenketo/Roadscanners.
- SAARENKETO, T.; SCULLION, T. (2000): Road evaluation with ground penetrating radar, Journal of Applied Geophysics, Jhrg. 43 (Nr. 2-4), S. 119-138.
- SAUNDERS, W.K. (1990): CW and FM Radar, in: SKOLNIK, M.I. (Hrsg.) (1990): Radar handbook, 2. ed., Electronics electrical engineering, McGraw Hill, New York.
- SCHÖN, J. (Hrsg.) (2015): Physical properties of rocks, Fundamentals and principles of petrophysics, 2nd Edition, Developments in petroleum science, volume 65, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- SCHÜTTLER, T. (2014): Satellitennavigation, Wie sie funktioniert und wie sie unseren Alltag beeinflusst, Technik im Fokus, Springer Vieweg, Berlin.
- SCULLION, T.; SAARENKETO, T. (2002): Ninth International Conference on Asphalt Pave-

ments, Implementation of ground penetrating radar technology in asphalt pavement testing, Danish Road Directorate, Ministry of Transport, Denmark.

SEBESTA, S.; SCULLION, T. (2003): Application of Infrared Imaging and Ground-Penetrating Radar to Detect Segregation in Hot-Mix Asphalt Overlays, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Jhrg. 1861, S. 37-43.

SEBESTA, S.; WANG, F.; SCULLION, T.; LIU, W. (2006): New infrared and radar systems for detecting segregation in hotmix asphalt construction, Further Development of NDT Devices to Identify Segregation in HMAC, FHWA/TX-05/0-4577-2, College Station, Texas.

STRYK, J.; ALANI, A. M.; MATULA, R.; POSPISIL, K. (2015): Innovative Inspection Procedures for Effective GPR Surveying of Critical Transport Infrastructures (Pavements, Bridges and Tunnels), in: BENEDETTO, A.; PAJEWSKI, L. (Hrsg.): Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar, Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering, Springer Verlag, Cham.

SUGAK, G.V. (2016): Stepped Frequency Continuous Wave Ground Penetrating Radar Applications, Kharkiv, Ukraine on: 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Piscataway, NJ.

ULRIKSEN, P. (1982): Application of Impulse Radar to Civil Engineering, Dissertation, Lund.

WEISS, J. M. (2009): Continuous-Wave Stepped-Frequency Radar for Target Ranging and Motion Detection, Midwest Instruction and Computing Symposium (Hrsg.), Midwest Instruction and Computing Symposium (MICS), April 17-19, Rapid City, South Dakota.

WILLETT, D. A.; MAHBOUB, K. C.; RISTER, B. (2006): Accuracy of Ground-Penetrating Radar for Pavement-Layer Thickness Analysis, Journal of Transportation Engineering, Jhrg. 132 (Nr. 1), S. 96-103.

WITTE, B.; SPARLA, P. (2015): Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen, 8., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann, Berlin.

Bilder

Bild 1: Zweckmäßiges Ablaufschema und Kernelemente einer Georadarmessung

Bild 2: Schematische Funktionsweise des Georadars und Einteilung der Straßensubstanz [ASTM International E17 Committee, 2010]

Bild 3: Prinzipskizze eines im Zeitbereich arbeitenden Georadars [MANACORDA et al., 2015]

Bild 4: Radargramm im linearen Graustufenformat der Messlinie 3 der Objektebene (Display Gain = 30, f = 2.000 MHz)

Bild 5: Schematische Darstellung der Reflexions- und Transmissionskoeffizienten an einer Grenzfläche [ANNAN, 2003]

Bild 6: Richtungsänderung eines elektromagnetischen Impulses an einer Grenzfläche (k = Kreiswellenzahl) [ANNAN, 2003]

Bild 7: Unterscheidung und Orientierung der Auflösungsrichtungen des Georadars [ANNAN, 2003]

Bild 8: Bestandteile eines Georadarsystems und des dazugehörigen Datenoutputs [nach ALTEKÖSTER, 2004]

Bild 9: Radargrammvergleich zwischen einer trockenen und einer feuchten Straßensubstanz

Bild 10: Konfiguration der Messtechnik auf der Objektebene

Bild 11: Erzeugung von stationären Kalibrierscans auf der Versuchsstrecke mittels Metallplatte

Bild 12: Straßenoberfläche als Bezugshorizont (Station 0 in vertikaler Richtung) im Radargramm

Bild 13: Wellenmuster im O-Scope (Wiggle) der oberen (Straßenoberfläche) und unteren Grenzfläche (Asphaltgrenze und Planum) des Asphaltoberbaus auf der Versuchsstrecke

Bild 14: Radargramm im Graustufenformat der Messlinie 1 der Objektebene mit Single-

- Picks zur Definition der Grenzflächen und Interpretation der Layer (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz)
- Bild 15: Prinzipielle Darstellung und Entstehung einer Diffraktionshyperbel im Radarogramm [HUGENSCHMIDT, 2009] mit ergänzendem Beispiel eines lokalen Hohlraums mit einem Durchmesser $D = 3,0$ cm (rechts) (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz)
- Bild 16: Prinzipskizze der Projektion der Messdaten des Georadars auf vorgegebene Punkte eines definierten Stationierungsrasters (hier: 1 Meter)
- Bild 17: Ablaufdiagramm über die Auswertung und straßenbautechnische Interpretation der Georadar-Daten im Post-Processing
- Bild 18: Künstlich erzeugte Störstellen in der Schichtgrenze durch Absanden, Wasserfilm und Überfettung
- Bild 19: Anordnung der Messlinien auf der Objektebene
- Bild 20: Stabstahl in der FSS zur Stationierungskontrolle
- Bild 21: Detektion eines künstlich erzeugten Hohlraums in der Asphaltbinderschicht
- Bild 22: Visueller Vergleich der Messfrequenzen 300, 800, 1.000 und 2.000 MHz
- Bild 23: Visueller Vergleich der Datendichte der Scanraten 10, 20, 50 und 100 Scans/m
- Bild 24: Anordnung des Stationierungsrasters der Bohrkerne in den Messlinien des Georadars auf der Objektebene
- Bild 25: Längsprofil der Messergebnisse der Auswertemethoden des Georadars und der Bohrkerne des 1m-Rasters für die Asphaltgrenze der Messlinie 1 (Scanrate = 10 Scans/m)
- Bild 26: Diffraktionshyperbel des Stabstahls in der FSS an Station 0+071 der Messlinie 2
- Bild 27: Radarogramm im Graustufenformat mit visuellen Charakteristika von Ronden in der Straßensubstanz in der Messlinie 3 (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz)
- Bild 28: Radarogramm im Graustufenformat mit visuellen Charakteristika von Ronden in der Straßensubstanz in der Messlinie 1 (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz)
- Bild 29: Linienprofil der Abweichungen der kalibrierten und unkalibrierten Georadar-Daten der Auswertemethoden vom Bohrkern bei der Wiedergabe der Asphaltgrenze der Messlinie 1 bei einer Scanrate von 10 Scans/m
- Bild 30: Flächendiagramm der Asphaltgrenze im Bereich der Belastungsklasse Bk3,2 der Versuchsstrecke
- Bild 31: Visuelle Eingrenzung der bautechnisch markanten Bereiche der Versuchsstrecke
- Bild 32: Visuelle Abgrenzung einer geschädigten Schichtgrenze im Radarogramm zwischen den Stationen 0+015 und 0+028 in der Messlinie 2 (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 50 Scans/m)
- Bild 33: Diffraktionshyperbeln im Radarogramm von lokalen Hohlräumen (links) und schichtspezifischen Rissen der Rissbreiten 3,0 mm und 10,0 mm (rechts) in der Messlinie 2 der Objektebene (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate 50 = Scans/m)
- Bild 34: Einzelreflexionen von Querrissen im Bereich der Betontragschicht ($f = 1.000$ MHz, Scanrate = 15 Scans/m) (BAB 2)
- Bild 35: Doppelreflexion von äquidistanten Fugen in Bereich der Betontragschicht ($f = 1.000$ MHz, Scanrate = 15 Scans/m) (BAB 2)
- Bild 36: Visuelle Charakteristik von lokalen Bestandsstrukturen (aufgemauerter Durchlass) auf der B79 durch lokale Veränderungen der Reflexionstiefe (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 20 Scans/m)
- Bild 37: Visuelle Charakteristik von offenporigen Schichten im Asphaltoberbau auf der BAB 61 (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 20 Scans/m)
- Bild 38: Visuelle Charakteristik von Bereichen mit und ohne Schichtenverbund im Asphalt-oberbau auf der BAB 38 (Display Gain =

- 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 10 Scans/m)
- Bild 39: Visuelle Charakteristik von Ronden zur Schichtdickemessung auf der BAB 38 (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 10 Scans/m)
- Bild 40: Visuelle Charakteristik des Aufbauwechsels in der Messlinie 3 der Objektebene (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 20 Scans/m)
- Bild 41: Visuelle Charakteristik eines Aufbauwechsels im Radargramm der Bundesstraße B10 in Rheinland-Pfalz (Display Gain = 30, $f = 2.000$ MHz, Scanrate = 25 Scans/m)
- Bild 42: Visuelle Charakteristik eines Aufbauwechsels mit gleichzeitigem Materialwechsel im Radargramm der Bundesautobahn BAB 2 (Display Gain = 30, $f = 1.000$ MHz, Scanrate = 15 Scans/m)
- Bild 43: Wellenmuster von Schichtgrenzen mit Schichtenverbund im O-Scope in der Messlinie 1 an den Stationen 0+054 und 0+055
- Bild 44: Wellenmuster von Schichtgrenzen mit Schichtenverbund und im überfetteten Zustand im O-Scope in der Messlinie 1 an den Stationen 0+157 und 0+158
- Bild 45: Wellenmuster von Schichtgrenzen mit und ohne Schichtenverbund im O-Scope in der Messlinie 1 an den Stationen 0+159 und 0+161
- Bild 46: Wellenmuster von Schichtgrenzen mit und ohne Schichtenverbund im O-Scope mit ergänzender Betrachtung der Asphaltgrenze in der Messlinie 1 bei ausschließlicher Abnahme von ϵ_r an den Stationen 0+060 und 0+061
- Bild 47: Wellenmuster von Schichtgrenzen mit und ohne Schichtenverbund im O-Scope und ergänzender Betrachtung der Asphaltgrenze in der Messlinie 1 an den Stationen 0+065 und 0+067
- Bild 48: Wellenmuster von Schichtgrenzen mit und ohne Schichtenverbund im O-Scope sowie mit zu- und abnehmender relativer Permittivität an der Station 0+066
- Bild 49: Amplitudencharakteristika einer Schichtgrenze mit und ohne ausreichendem Schichtenverbund (Display Gain = 12)
- Bild 50: Diffraktionshyperbel eines Hohlraums $D = 3,0$ cm (oben nicht migriert – unten migriert)
- Bild 51: Auszug aus dem Streckenband der homogenen Abschnitte auf Basis der Asphaltgrenze des Untersuchungsabschnitts der BAB 14
- Bild 52: Beispielhafter Auszug aus dem Streckenband der homogenen Abschnitte auf Basis des Konstruktionsaufbaus des Untersuchungsabschnitts der B79
- Bild 53: Auszug aus dem Streckenband der homogenen Abschnitte auf Basis der flächenhaften Schädigung der Straßensubstanz des Untersuchungsabschnitts der B79
- Bild 54: Homogene Abschnitte der Objektebene auf Basis der Auswertemethode „unkalibriert_automatic“ für die Messlinien 1 (oben), 2 (mitte) und 3 (unten)
- Bild 55: Homogene Abschnitte der Objektebene auf Basis der Auswertemethode „unkalibriert_default_Value“ für die Messlinien 1 (oben), 2 (mitte) und 3 (unten)
- Bild 56: Bautechnisch markanter Baulosanfang der Versuchsstrecke mit erheblicher Änderung der Asphaltgrenze
- Bild 57: Zusatzreflexion im Radargramm durch einen vorbeifahrenden LKW – in der in Fahrtrichtung links montierten 1 GHz Antenne
- Bild 58: Bohrkern der Objektebene ohne Schichtenverbund zwischen Asphaltbinder- und Asphalttragschicht
- Bild 59: Markierungslinien (links) und Messschema (rechts) am Bohrkern gemäß TP D-StB
- Bild 60: Bohrkern der Versuchsstrecke mit rauer und ungleichmäßiger Unterseite
- Bild 61: Anwendungsgebiete für Georadarmessungen

- Bild 62: Konstruktionsaufbau der Bundesstraße B10 zwischen den Stationen 1+032 und 1+053 (Scanrate = 25 Scans/m)
- Bild 63: Konstruktionsaufbau der Bundesstraße B 10 zwischen den Stationen 1+073 und 1+097 (Scanrate = 25 Scans/m)
- Bild 64: Konstruktionsaufbau der Bundesstraße B 10 zwischen den Stationen 1+205 und 1+225 (Scanrate = 25 Scans/m)
- Bild 65: Beispielhafter CSV-Export im Rohformat der Messlinie 2 der Objektebene (f = 2.000 MHz, Scanrate = 20 Scans/m, Stationierungsraster = 1 m)
- Bild 66: Beispielhafte Struktur des Schichtenverzeichnisses
- Bild 67: Ausschnitt des Schichtenprofils zwischen den Stationen 1+000 bis 1+200 der BAB 38 in Fahrtrichtung Leipzig
- Bild 68: Auszug aus einer abschließenden Darstellung der homogenen Abschnitte des Untersuchungsabschnitts der B79
- Bild 69: Verschneidung von Georadar-Daten mit weiteren Streckenbändern für die BAB 2 zwischen AS Bielefeld-Ost und AS Gütersloh [Heller Ingenieurgesellschaft mbH, 2018]
- Bild 70: Verschneidung von schichtspezifischen Georadar-Daten mit weiteren Streckenbändern für die BAB 2 zwischen AS Bielefeld-Ost und AS Gütersloh [Heller Ingenieurgesellschaft mbH, 2018]
- Bild 71: Verschneidung von Georadar-Daten mit den Zustandsbändern der messtechnischen ZEB für die BAB 2 zwischen AS Bielefeld-Ost und AS Gütersloh [Heller Ingenieurgesellschaft mbH, 2018]
- Bild 72: Tabellenkalkulatorische Oberfläche mit Zuordnung von Untersuchungsabschnitt und Nummerierung als Grundlage für die Erstellung von Zielverzeichnissen und der Verschiebung der entsprechenden Datensätze
- Bild 73: Radargramm im Graustufenformat mit Schichtgrenzen unterschiedliche Farbcodierung und Ausprägung
- Bild 74: Signalverlauf eines Scans an zwei Schichtgrenzen mit ausreichendem dielektrischem Kontrast (Display Gain = 25, f = 2.000 MHz, Scanrate = 100 Scans/m)
- Bild 75: Beispielhafte Export-Matrix aus Scan, Sample und Amplitude
- Bild 76: Grafisches Ergebnis der Extremwertanalyse einer Amplitudenmatrix
- Bild 77: O-Scope eines Scans mit einer errechneten (orange) und einer geglätteten (grünen) Envelope um den positiven Realteil
- Bild 78: Entwurf einer Verbindung von Extremwerten zu größeren Schichtelementen bei gleichzeitiger Filterung von Einzelwerten
- Bild 79: Picks in einer Schichtgrenze im Radargramm deren Punktinformationen aus der Extremwertanalyse abgeleitet und in die vorhandene Datenstruktur wieder implementiert wurden
- Bild 80: Beispielhafter Datenexport von Georadar-Daten mit spaltenweiser Zuordnung der Exportvariablen zur Nutzung innerhalb des Post-Processings
- Bild 81: Eingabemaske zur Auswahl von Teilprozessen einer straßenbautechnischen Interpretation
- Bild 82: Beispielhafter Datenexport mit Lücken
- Bild 83: Maske zur Definition von Schichtbezeichnungen
- Bild 84: Maske zur nachträglichen Bearbeitung der Schichtenfolge des Konstruktionsaufbaus
- Bild 85: Maske Angabe der Betriebskilometrierung als Startwert der Georadarmessung
- Bild 86: Maske zur Eingabe und Verortung von Bohrkernentnahmestellen im Datensatz
- Bild 87: Maske zur Linienformatierung im Längsprofil und Tiefenschnitt

Tabellen

- Tab. 1: Zusammenhang zwischen der Messfrequenz und den messtechnischen Parametern Detektionstiefe und Auflösungsvermögen [zusammengestellt nach EN-DOM et al., 2008 und STRYK et al., 2015]
- Tab. 2: Wesentliche Parameter des Messsystems
- Tab. 3: Untersuchungsziele einer Georadarmessung mit empfohlener Messfrequenz [GOLKOWSKI, 2003]
- Tab. 4: Parameter des Untersuchungsmediums
- Tab. 5: Parameter der Außeneinflüsse
- Tab. 6: Messeinstellungen der Radarsteuerung SIR 20®
- Tab. 7: Messeinstellungen der Radarsteuerung SIR 30®
- Tab. 8: Spezifische Konstruktionsdetails der Probefelder der Objektebene
- Tab. 9: Untersuchungsergebnisse zur vorhandenen ungebundenen Lagerfläche und der Frostschutzschicht
- Tab. 10: Schichtgrenzen des Probefeldes 1
- Tab. 11: Schichtgrenzen der Probefelder 2 und 3
- Tab. 12: Wetterdaten Trockenmessung vom 26.10.2016
- Tab. 13: Summenbetrachtung der Abweichungen zwischen Bohrkern und Richtwert der RStO auf der Objektebene
- Tab. 14: Maximale Abweichungen der Auswertemethoden des Georadars in Bezug auf den korrespondierenden Bohrkern in den Schichtgrenzen der Objektebene differenziert nach Messlinie bei einer Scanrate von 10 Scans/m
- Tab. 15: Maximale Abweichungen der Auswertemethoden des Georadars in Bezug auf den korrespondierenden Bohrkern in den Schichtgrenzen der Objektebene differenziert nach Messlinie bei einer Scanrate von 20 Scans/m
- Tab. 16: Maximale Abweichungen der Auswertemethoden des Georadars in Bezug auf den korrespondierenden Bohrkern in den Schichtgrenzen der Objektebene differenziert nach Messlinie bei einer Scanrate von 50 Scans/m
- Tab. 17: Maximale Abweichungen der Auswertemethoden des Georadars in Bezug auf den korrespondierenden Bohrkern in den Schichtgrenzen der Objektebene differenziert nach Messlinie bei einer Scanrate von 100 Scans/m
- Tab. 18: Abweichungsgrenzen zwischen dem Georadarverfahren und den korrespondierenden Bohrkernen differenziert nach Scanrate und Auswertemethodik des Georadars in cm
- Tab. 19: Arithmetische Mittelwerte der relativen Permittivität ϵ_r der in den Messlinien der Objektebene entnommenen Bohrkern differenziert nach Schichtgrenze für den Bereich der Belastungsklasse Bk3,2
- Tab. 20: Arithmetische Mittelwerte der relativen Permittivität ϵ_r der in den Messlinien der Objektebene entnommenen Bohrkern differenziert nach Schichtgrenze für den Bereich der Belastungsklasse Bk100
- Tab. 21: Datenseitig modifizierte arithmetische Mittelwerte der relativen Permittivität ϵ_r der Asphaltsschichten der in den Messlinien der Versuchsstrecke entnommenen Bohrkern für den Bereich der Belastungsklasse Bk3,2
- Tab. 22: Datenseitig modifizierte arithmetische Mittelwerte der relativen Permittivität ϵ_r der Asphaltsschichten der in den Messlinien der Versuchsstrecke entnommenen Bohrkern für den Bereich der Belastungsklasse Bk100
- Tab. 23: Verteilung der Reflexionskoeffizienten nach (3.12) zur Einschätzung des Schichtenverbundes in Bezug auf die Signallaufzeit
- Tab. 24: Beispielhafter Auszug aus der Berechnungsgrundlage zur maximalen Änderung der Asphaltgrenze aufeinanderfolgender Auswertabschnitte (AA) des Untersuchungsabschnitts der BAB 14

Tab. 25: Maximale Spannweiten der Signallaufzeit beim wiederholten Picken der Schichtgrenzen im Konstruktionsaufbau der Objektebene

Tab. 26: Maximale Spannweiten der Signallaufzeit beim wiederholten Picken der Schichtgrenzen im Konstruktionsaufbau der Objektebene unter Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche

Tab. 27: Mittlere Spannweiten der Signallaufzeit beim wiederholten Picken der Schichtgrenzen im Konstruktionsaufbau der Objektebene unter Ausschluss der bautechnisch markanten Bereiche

Tab. 28: Einteilung der Gesamtmächtigkeit des gebundenen Oberbaus gemäß RStO mit entsprechender Farbcodierung für die Visualisierung

Anlagen

Anlage A Programmablaufpläne Processing

Anlage B Bauüberwachung Objektebene

Anlage B1 Übersichtslageplan Probefeld

Anlage B2 Lastplattendruckversuche

Anlage B3 Körnungslinien

Anlage B4 Gesamtübersicht Einbaufehler

Anlage B5 Systemskizze

Anlage B6 Kontrolluntersuchungen Asphalt am Mischgut

Anlage B7 Übersicht Messlinien

Anlage B8 Fotodokumentation

Anlage B9 Bohrkernanalysen

Anlage B10 Kontrollprüfungen am Bohrkern

Anlage C CSV Exporte Objektebene und Netzebene

Anlage C1 CSV Objektebene

Anlage C2 CSV Netzebene

Anlage D Visuelle Charakteristika von Substanzschäden

Anlage D1 Objektkatalog

Anlage D2 Netzkatalog

Anlage F Auswertung Objektebene

Anlage F2 Schichtdickenmessungen und Raumdichten am Bohrkern

Anlage F3 Tatsächlicher Einbauzustand Objektebene

Anlage F4 Schichtenprofile Objektebene

Anlage F5 Flächendiagramme Asphaltgrenze

Anlage G Netzebene

Anlage G1 Streckenübersicht Netzebene

Anlage G2 Fotodokumentation Strecken

Anlage G3 Bohrkerndokumentation Sachsen-Anhalt

Anlage G4 Bohrkerndokumentation Rheinland-Pfalz

Anlage G5 Bohrkerndokumentation Nordrhein-Westfalen

Anlage H Ergebnisse Netzebene

Anlage H2 Auswertung A 38

Anlage H3 Auswertung A 14

Anlage H4 Auswertung B 79

Anlage H5 Auswertung A 61

Anlage H6 Auswertung B 10

Anlage H7 Auswertung A 45

Anlage H8 Auswertung A 2

Anlage H9 Auswertung B 54

Anlage H10 Auswertung B 1

Anlage H11 Auswertung B 236

Anlage I Messunsicherheit Signallaufzeiten

**Anlage J Mathematische statistische
Auswertung der Schichtgrenzen**

- Anlage J1 Deskriptive Statistiken der Schichtgrenzen
- Anlage J2 Häufigkeitstabellen
- Anlage J3 Linienprofile
- Anlage J4 Summenbetrachtung Abweichungsgrenzen

Anlage K Studie zur relativen Permittivität**Anlage L Reflexionskoeffizienten****Anlage M Homogene Abschnitte**

- Anlage M1 Bildung von homogenen Abschnitten
- Anlage M2 Tabellen homogene Abschnitte
(Gesamt Excel)
- Anlage M3 Auswertung A 38
- Anlage M4 Auswertung A 14
- Anlage M5 Auswertung B 79
- Anlage M6 Auswertung A 61
- Anlage M7 Auswertung B 10
- Anlage M8 Auswertung A 45
- Anlage M9 Auswertung A 2
- Anlage M10 Auswertung B 54
- Anlage M11 Auswertung B 1
- Anlage M12 Auswertung B 236

**Anlage N Möglichkeiten der Visualisierung
von Messdaten****Anlage P Bewertungsmatrizen**

- Anlage P1 Objektebene
- Anlage P2 Netzebene

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt

für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Birle, Cudmani, Melsbach

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichotka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

Koukoulidou, Birle, Cudmani

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze Klein, Gehlen, Kränkel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Mielich

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskawetz € 23,00

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

Büchler, Wüstuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

Villaret, Augter, Kayser, Riwe

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW

Schipek, Steffen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette

Cudmani, Henzinger, Birle, Barka

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 160: Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton

Rigo, Unterderweide

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 161: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz

Kathmann, Schroeder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 162: Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

Böhm, Eickschen, Hermerschmidt, Müller, Pierkes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie

Beginn, Belke, Oeser, Meyer, Paffrath, Wellner, Clauß,

Beckedahl, Koppers, Schmidt, Erdmann, Schmidt, Hofmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

Cudmani, Heyer, Birle, Möller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 165: Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 166: Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Demon, Reiche, Haas, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 167: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung

K. Villaret, S. Villaret, Kathmann, Oeser, Ückermann, Schröder,

Riwe

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 168: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbauphase

Gehrke, Stephan, Weigel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 169: Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 170: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphaltsschichten - Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens

Radenberg, Twer, Louis, Buscham

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)

Bald, Böhm, Čičković, Tielmann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Trag-schichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise

Villaret, Beckenbauer, Riwe, Tschernack

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 175: Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton

Altreuther, Beckenbauer, Ertsey, Otto, Schubert, Kropp, Hoever

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 176: Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter

Michaelides, Koukoulidou, Birle, Heyer, Vogt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 177: Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen

Breitenbücher, Buckenhüskes, Radenberg, Twer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 178: Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton

Weise, Hüskes, Niedack-Nad

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 179: Die neue Autobahnverwaltung des Bundes – das Straßenrecht der Verkehrswende

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 180: Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

Kathmann, Hermes, Kucera, Stöver, Neumann, Lehmkuhl, Pfeifer

€ 14,50

2023

S 181: Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

Hülsbömer, Weißelborg, Gogolin, Mörchen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.